Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

XXVI Международная научная конференция

ВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Сборник статей

Часть 3

29 мая – 2 июня 2023 г.

Санкт-Петербург

Санкт-Петербург, Россия

2023

УДК 621.38
ББК 32.85
В67

В67 Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: XXVI Междунар. науч. конф. (СПб., 29 мая – 2 июня 2023 г.): сб. статей: в 3 ч. Ч. 3. СПб.: ГУАП, 2023. с.
ISBN 978-5-8088-1841-5
ISBN 978-5-8088-1844-6 (Ч. 3)

Материалы XXVI Международной научной конференции отражают современное состояние волновой электроники и ее применение в информационных и телекоммуникационных системах.

Представляют интерес для широкого круга исследователей, преподавателей, аспирантов и специалистов в области акустооптики, акустоэлектроники.

УДК 621.38
ББК 32.85

ISBN 978-5-8088-1841-5
ISBN 978-5-8088-1844-6 (Ч. 3)

© Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023

АКУСТООПТИКА
И АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.372.63

А. С. Багдасарян
доктор технических наук, профессор,
академик НАН Республики Армении
Ю. В. Гуляев*
доктор физико-математических наук, профессор,
академик и член Президиума РАН
С. А. Доберштейн**
кандидат технических наук
Т. В. Синицына***
доктор технических наук
*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
**Омский научно-исследовательский институт приборостроения
***Омский научный центр Сибирского отделения РАН
****ООО «БУТИС»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЕРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ С МАЛЫМИ ПОТЕРЯМИ И ВЫСОКОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОСТЬЮ АЧХ

Рассмотрены подходы к реализации веерных фильтров на ПАВ с наклонными электродами с относительной полосой пропускания 4–75%, коэффициентом прямоугольности 1,1–1,96 и вносимыми потерями 5–18 дБ.
Ключевые слова: ПАВ, фильтр, веерный ВШП, малые потери.

Работа выполнена по государственному заказу Омского научного центра СО РАН (номер государственной регистрации проекта 121121700062-3).

A. S. Bagdasaryan
Dr. Sc., Tech., Professor, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia
Yu. V. Gulyaev*
PhD, Phys.-Math., Professor, Academician and member of Presidium of the Russian Academy of Science
S. A. Dobershtein***
PhD, Tech.
T. V. Sinitsina***
Dr. Sc., Tech.
*Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of Russian Academy of Science
**Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering
***Omsk Scientific Center Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
***Limited Liability Company «BUTIS»

USE OF THE FAN-SHAPED IDTS FOR CREATING THE WIDEBAND SAW FILTERS WITH THE LOW INSERTION LOSS AND HIGH RECTANGULARITY OF FREQUENCY RESPONSE

The approaches for a realization of the fan-shaped SAW filters with the slanted electrodes with the fractional bandwidth of 4–75%, shape factor of 1,1–1,96 and insertion loss of 5–18 dB were considered.
Keywords: SAW, filter, fan-shaped IDT, low loss.

Введение

В настоящее время техника ПАВ, будучи одной из самых инновационных технологий в мире, занимает ключевые позиции в системах телекоммуникаций. По-прежнему полосовые фильтры на ПАВ составляют основу техники ПАВ [1]. В современных системах телекоммуникаций требуются фильтры с широкой полосой пропускания, малыми вносимыми потерями (ВП), высокой избирательностью и прямоугольностью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Разработка таких фильтров на ПАВ – сложная и противоречивая задача [2; 3]. В этой связи перспективным методом создания широкополосных фильтров на ПАВ с высокой избирательностью и прямоугольностью является использование веерных встречно-штыревых преобразователей (ВШП) [4–7].

В веерном ВШП все электроды наклонены на некоторый угол относительно нормали к направлению распространения ПАВ (рис. 1). Этот угол для каждого электрода по мере удаления от центрального электрода возрастает от $-\Theta_{max}$ до Θ_{max} (рис. 1). В широкой части веерного ВШП период электродов максимальный λ_1, а в узкой части – минимальный λ_2. Это соответствует распределению частот акустического синхронизма вдоль апертуры W ВШП от минимального значения $f_1 = V/\lambda_1$ до максимального значения $f_2 = V/\lambda_2$, что определяет полосу пропускания Δf веерного ВШП (рис. 1). Здесь V – скорость ПАВ, λ_0 – период электродов, f_0 – частота акустического синхронизма в центральном сечении веерного ВШП.

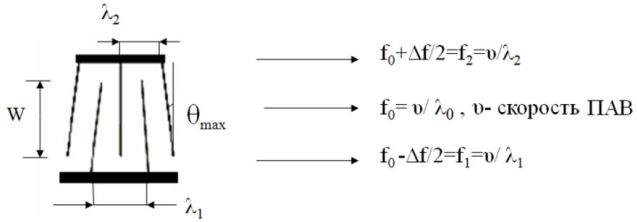


Рис. 1. Веерный ВШП

Основные подходы к реализации веерных фильтров

Веерные фильтры подобно обычным фильтрам на ПАВ выполняются по двух- [4; 6; 7] или по трехпреобразовательной схеме, когда веерный ВШП расположен между двумя выходными веерными ВШП. Причем в последнем случае выходные преобразователи расположены симметрично относительно входного

ВШП и соединены последовательно [8; 9]. Такая симметричная схема уменьшает потери на двунаправленность излучения входного веерного ВШП, подавляет паразитный сигнал тройного прохождения (СТП) и уменьшает пульсации АЧХ в полосе пропускания. Последовательное включение выходных веерных ВШП упрощает согласование с внешней нагрузкой и обеспечивает плоскую форму АЧХ в полосе пропускания.

Основными характеристиками веерных фильтров являются относительная полоса пропускания $\Delta f/f_0$, прямоугольность АЧХ, затухание в полосе задерживания, пульсации АЧХ и ВП в полосе пропускания. Требуемая $\Delta f/f_0$ обеспечивается соответствующим углом наклона электродов веерных ВШП. Затухание в полосе задерживания осуществляется взвешиванием преобразователей. Прямоугольность АЧХ при заданной $\Delta f/f_0$ обеспечивается определенным числом электродов. Пульсации АЧХ зависят от подавления СТП, а ВП определяются потерями на двунаправленность, на взвешивание, на расходимость акустического потока, на рассогласование с нагрузками и потерями в элементах согласования. Для обеспечения заданных параметров веерных фильтров по $\Delta f/f_0$, затуханию в полосе задерживания, пульсациям АЧХ и ВП в полосе пропускания необходимо учесть все перечисленные факторы.

Топология и АЧХ двухпреобразовательного веерного фильтра на центральную частоту f_0 = 70 МГц на срезе YZ $LiNbO_3$ представлена на рис. 2. Получены ВП 35 дБ, $\Delta f/f_0$ = 50% с пульсациями 1,5 дБ, коэффициент прямоугольности АЧХ $K_П$ = 1,13, затухание в полосе задерживания 25–30 дБ в тракте 50 Ом с L-согласованием [6]. На рис. 3 показаны топология и АЧХ трехпреобразовательного веерного фильтра на f_0 = 55,7 МГц с $\Delta f/f_0$ = 5,2% и пульсациями 0,5 дБ в тракте 50 Ом с LC-согласованием на пьезокерамике. Для получения малых пульсаций АЧХ в полосе пропускания применены веерные ВШП с расщепленными электродами, а выходные преобразователи выполнены наклонными для эффективного подавления СТП. Фильтр обеспечил ВП 10 дБ, затухание в полосе задерживания 30 дБ, $K_П$ = 1,9 [8].

Примеры практической реализации веерных фильтров на ПАВ с уменьшенными потерями и улучшенной избирательностью

В веерных фильтрах со взвешиванием удалением электродов (ВУЭ) большое затухание в полосе задерживания реализуется комбинацией из входного ВУЭ веерного ВШП и выходного обычного веерного ВШП [10; 11]. На рис. 4 показана топология и АЧХ двухпреобразовательного фильтра с ВУЭ во входном веерном ВШП на f_0 = 19 МГц с полосой пропускания 5,7 МГц по уровню –3 дБ ($\Delta f/f_0$ = 30%) и пульсациями 0,1 дБ на срезе XY/112° $LiTaO_3$. В тракте 50 Ом фильтр показал ВП 45 дБ, затухание в полосе задерживания 45 дБ при отстройке ±5 МГц от f_0, $K_П$ = 1,1 [11].

Для увеличения избирательности веерных фильтров эффективно использование емкостного взвешивания электродов (ЕВЭ) преобразователей (рис. 5) [12; 13].

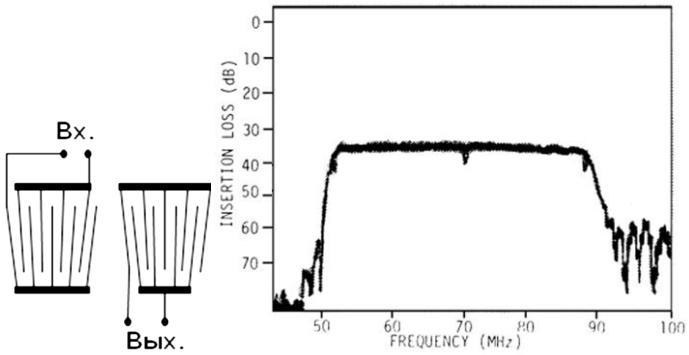


Рис. 2. Топология и АЧХ двухпреобразовательного веерного фильтра [6]

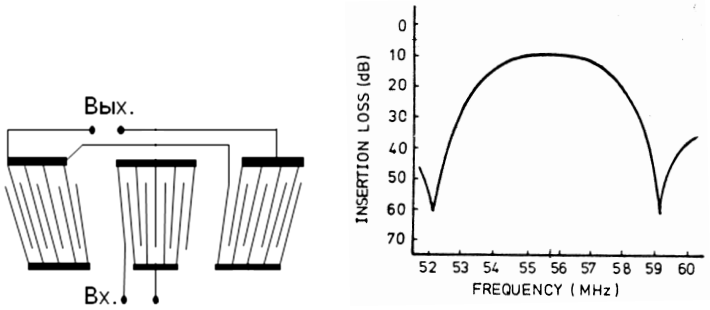


Рис. 3. Топология и АЧХ трехпреобразовательного веерного фильтра [8]

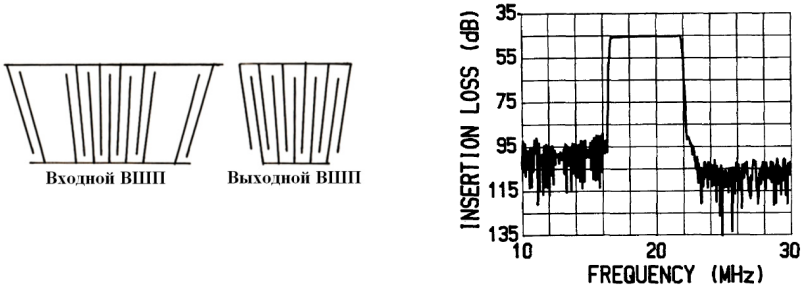


Рис. 4. Топология и АЧХ двухпреобразовательного веерного фильтра с ВУЭ [11]

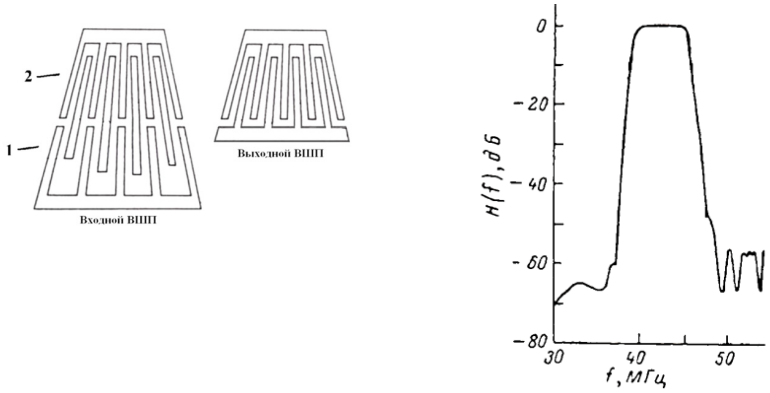


Рис. 5. Топология и АЧХ двухпреобразовательного веерного фильтра с ЕВЭ [13]

Поскольку веерный ВШП имеет импульсный отклик близкий к функции sin(x)/x, то для формирования АЧХ, близкой к прямоугольной и с большим подавлением боковых лепестков, необходимо во временной области функцию sinx/x умножить на соответствующую «оконную функцию» с гладкой характеристикой, тогда результирующая импульсная характеристика будет иметь малый уровень боковых лепестков при конечной его длине. Через преобразование Фурье в частотной области этому будет соответствовать близкая к прямоугольной АЧХ с большим затуханием в полосе задерживания [2; 12]. В топологии веерного ВШП с ЕВЭ эта процедура осуществляется емкостными делителями дополнительной структуры электродов 1 совместно с элементами основной структуры 2 за счет изменения их перекрытия прямо пропорционально дополнительному весовому коэффициенту (множителю). Таким образом, закон изменения перекрытия электродов в дополнительной структуре определяется только дополнительным весовым множителем импульсного отклика («оконной функцией»), а не импульсным откликом в целом. При этом участки с малым перекрытием электродов отсутствуют, что повышает точность воспроизведения заданной АЧХ преобразователя и увеличивает его избирательность. На рис. 5 представлена топология и АЧХ двухпреобразовательного веерного фильтра с ЕВЭ во входном ВШП на f_0 = 41,4 МГц с полосой пропускания 6,3 МГц по уровню –3 дБ ($\Delta f/f_0$ = 15%) и пульсациями 0,5 дБ на срезе YX/128° $LiNbO_3$. Фильтр обеспечил ВП 17 дБ, затухание в полосе задерживания 55–65 дБ при отстройках ±10 МГц от f_0, $K_П$ = 1,3 в тракте 50 Ом [13].

Блочное взвешивание (БВ) – другая модификация по сути емкостного взвешивания (рис. 6) [7]. Веерный ВШП разделен на блоки – ВШП, соединенные последовательно и с определенным числом электродов. Такие блоки представляют собой эквивалентные емкостные делители, которые распределяют

напряжение по всей длине веерного ВШП, т. е. осуществляют фактически емкостное взвешивание электродов веерного ВШП.

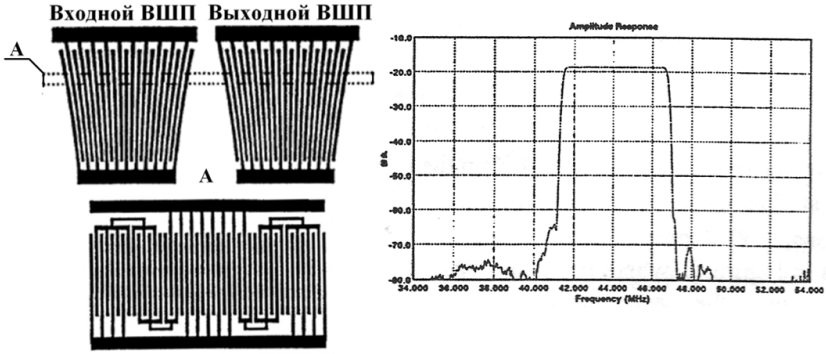


Рис. 6. Топология и АЧХ двухпреобразовательного веерного фильтра с БВ [7]

Топология и АЧХ веерного фильтра на f_0 = 44 МГц с полосой пропускания 5,3 МГц по уровню –3 дБ ($\Delta f/f_0$ = 12 %) и пульсациями <0,5 дБ на срезе XY/112° $LiTaO_3$ приведена на рис. 6. В топологии фильтра использованы разные входной и выходной веерные ВШП с БВ. В тракте 50 Ом фильтр показал ВП 18,7 дБ, затухание в полосе задерживания >50 дБ при отстройке ±5 МГц от f_0, $K_П$ = 1,1 [7].

Для уменьшения потерь на двунаправленность излучения веерных ВШП используют различные типы однофазных однонаправленных преобразователей (ООНП) в веерном исполнении [7]. На рис. 7 показаны топология и АЧХ двухпреобразовательного веерного фильтра на ООНП с БВ на f_0 = 70 МГц с полосой пропускания 9 МГц по уровню –3 дБ ($\Delta f/f_0$ = 13 %) и пульсациями 0,5 дБ на срезе YZ $LiNbO_3$. Фильтр обеспечил ВП 9 дБ, затухание в полосе задерживания >50 дБ при отстройках ±10 МГц от f_0, $K_П$ = 1,3 в тракте 50 Ом с LC-согласованием [7].

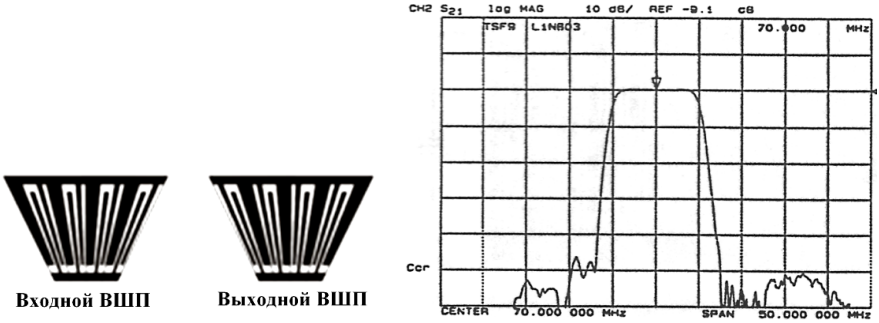


Рис. 7. Топология и АЧХ двухпреобразовательного фильтра на ООНП с БВ [7]

С увеличением $\Delta f/f_0$ в двухпреобразовательной веерной структуре на ООНП на срезе YZ $LiNbO_3$ возрастают ВП, поскольку затруднительно обеспечить высокую направленность ООНП в широкой полосе частот. Для веерных фильтров на f_0 = 70–75 МГц с ООНП на срезе YZ $LiNbO_3$ достигаются ВП 10,8 дБ с $\Delta f/f_0$ = 20%, затухание в полосе задерживания 45–50 дБ, $К_П$ = 1,3 [14]. Для аналогичных фильтров с $\Delta f/f_0$ = 51% ВП увеличиваются уже до уровня 19,5 дБ при той же избирательности и прямоугольности АЧХ [7]. Наилучшие результаты для представленного подхода получены для $\Delta f/f_0$ = 5,5%. Топология и АЧХ двухпреобразовательного веерного фильтра на f_0 = 140,4 МГц с полосой пропускания 7,75 МГц по уровню –3 дБ ($\Delta f/f_0$ = 5,5%) и пульсациями 0,5 дБ на срезе YX/128° $LiNbO_3$ приведена на рис. 8. В фильтре использованы квазивеерные ВШП (со ступенчатыми электродами) и ВУЭ во входном и выходном преобразователе. Получены ВП 5,2 дБ, затухание в полосе задерживания >40 дБ при отстройке ±10 МГц от f_0, $К_П$ = 1,96 [15].

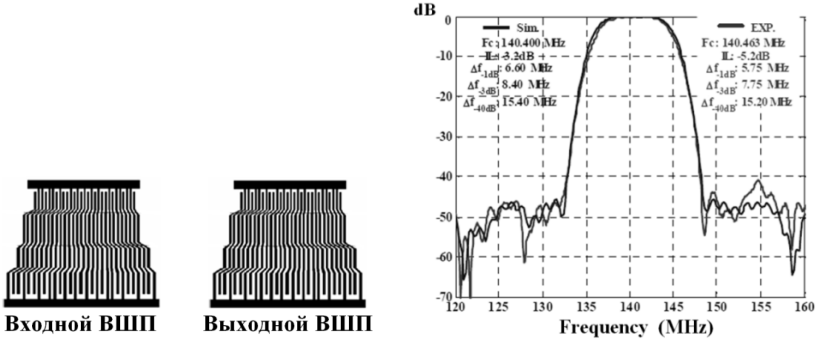


Рис. 8. Топология и АЧХ двухпреобразовательного квазивеерного фильтра на ООНП с ВУЭ [15]

На основе двухпреобразовательных веерных фильтров с ООНП, ВУЭ и БВ разработана конструктивно-технологическая платформа от ведущих мировых производителей техники ПАВ для массового производства веерных фильтров для системы беспроводной связи WLAN на диапазон частот 240–450 МГц [16–19]. На рис. 9 приведена АЧХ фильтра для системы WLAN на f_0 = 374 МГц с полосой пропускания 22 МГц по уровню –3 дБ ($\Delta f/f_0$ = 5,9%) на срезе YZ $LiNbO_3$ в SMD-корпусе размерами 5×5×1,35 мм. Фильтр показал ВП 8,5 дБ, затухание в полосе задерживания 40–45 дБ при отстройке ±25 МГц от f_0, $К_П$ = 1,3, пульсации АЧХ не более 1 дБ в тракте 50 Ом и балансном тракте 200 Ом с LC-согласованием [16].

Топология и АЧХ трехпреобразовательного веерного фильтра на f_0 = = 255 МГц с полосой пропускания 61,2 МГц по уровню –3 дБ ($\Delta f/f_0$ = 24%) и пульсациями 0,5 дБ в тракте 50 Ом с LC-согласованием на срезе YX/128° $LiNbO_3$ в SMD-корпусе размерами 5×5×1,8 мм показана на рис. 10. Фильтр

обеспечил ВП 6,5 дБ, затухание в полосе задерживания 25–30 дБ при отстройке ±5 МГц от f_0, $К_П$ = 1,28 [20].

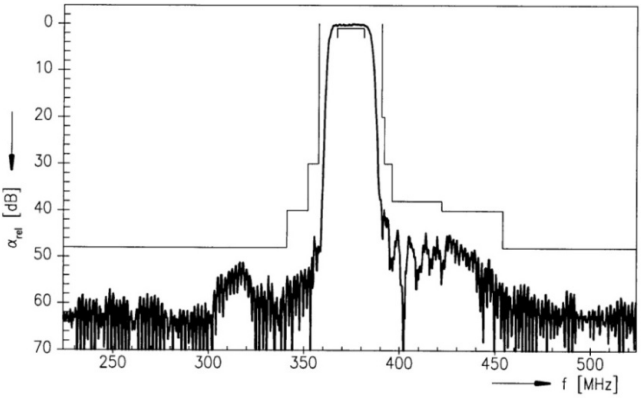


Рис. 9. АЧХ веерного фильтра для системы WLAN на f_0 = 374 МГц [16]

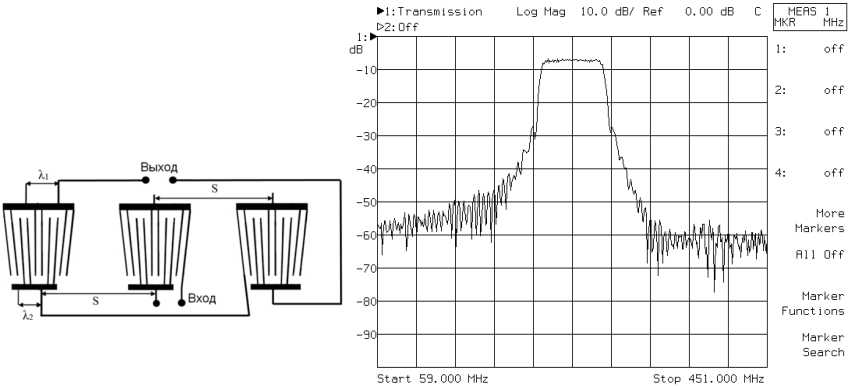


Рис. 10. Топология и АЧХ трехпреобразовательного веерного фильтра с $\Delta f/f_0$ = 24% [20]

На рис. 11 приведена топология и АЧХ веерного фильтра с входным ВУЭ веерным ВШП на f_0 = 255,6 МГц с полосой пропускания 30 МГц по уровню –3 дБ ($\Delta f/f_0$ = 11,7%) и пульсациями 0,5 дБ на срезе YX/128° $LiNbO_3$. Фильтр обеспечил ВП 7 дБ, затухание в полосе задерживания >35 дБ при отстройке ±45 МГц от f_0, $К_П$ = 1,5 в тракте 50 Ом с LC-согласованием в SMD-корпусе размерами 5×5×1,8 мм [20].

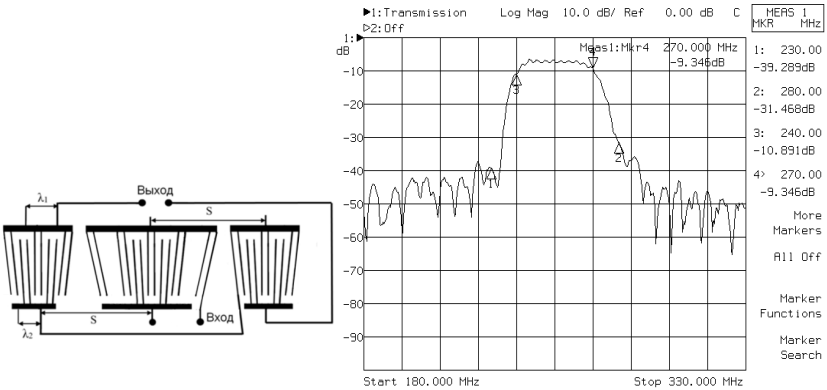


Рис. 11. Топология и АЧХ трехпреобразовательного веерного фильтра с ВУЭ [20]

Веерные фильтры с относительной полосой пропускания >50 %

Для создания сверхширокополосных устройств на ПАВ с $\Delta f/f_0 > 50\%$ и малыми ВП эффективно использовать широкополосные веерные ПАВ фильтры с уменьшенными ВП и улучшенной избирательностью. Фактором, ограничивающим применение веерных структур на ПАВ для этой цели, является k^2 пьезоматериала (k – коэффициент электромеханической связи). Причем если большую $\Delta f/f_0 = 70\%$ и удается реализовать на веерной двухпреобразовательной структуре на срезе YZ $LiNbO_3$, то только без ООНП и поэтому с большими ВП [14]. Для рэлеевской ПАВ на срезе YZ $LiNbO_3$ значение $k^2 = 4–5\%$, и оно недостаточно для обеспечения высокой направленности ООНП и реализации малых ВП для $\Delta f/f_0 > 50$ %. АЧХ двухпреобразовательного квазивеерного фильтра на $f_0 = 350$ МГц с полосой пропускания 250 МГц ($\Delta f/f_0 = 70$ %) и пульсациями <1 дБ на срезе YZ $LiNbO_3$ представлена на рис. 12. Фильтр на двунаправленных веерных ВШП обеспечил ВП 34,4 дБ, затухание в полосе задерживания >30 дБ, $К_П = 1{,}08$ [14].

В этой связи перспективно использование вытекающих ПАВ на срезе YX/41° $LiNbO_3$ с $k^2 = 18$ %. На рис. 13 показана топология и АЧХ веерного двухпреобразовательного фильтра на $f_0 = 140$ МГц с полосой пропускания 88,2 МГц по уровню –3 дБ ($\Delta f/f_0 = 63$ %) и пульсациями 1 дБ на срезе YX/41°$LiNbO_3$. Для уменьшения потерь на двунаправленность использованы специальные типы ООНП с высокой направленностью с неоднородно расщепленными электродами, оптимизированные для вытекающих ПАВ. Для минимизации потерь на распространение вытекающих ПАВ применен металлизированный экран (МЭ) между ВШП. Веерные ВШП выполнены секционированными для улучшения согласования и увеличения избирательности фильтра. Получены ВП 12,7 дБ, затухание в полосе задерживания >30 дБ при отстройке ±60 МГц от f_0, $К_П = 1{,}1$ в тракте 50 Ом с LC-согласованием [21].

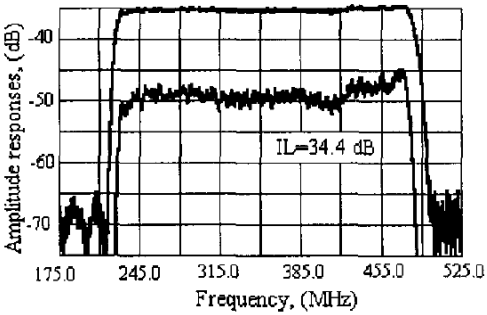


Рис. 12. АЧХ двухпреобразовательного квазивеерного фильтра с $\Delta f/f_0$ = 70% на срезе YZ $LiNbO_3$ [14]

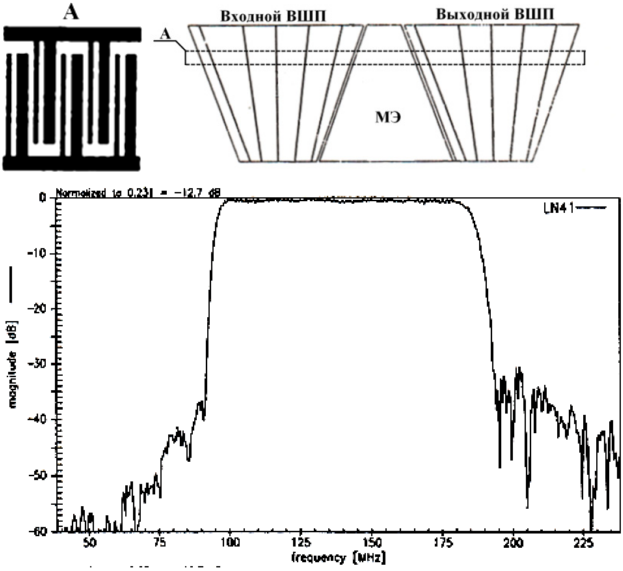


Рис. 13. Условная топология и АЧХ секционированного двухпреобразовательного веерного фильтра на ООНП с неоднородно расщепленными электродами с $\Delta f/f_0$ = 63% на срезе YX/41° $LiNbO_3$ [21]

АЧХ двухпреобразовательного веерного фильтра на ООНП с неоднородно расщепленными электродами на f_0 = 140 МГц с полосой пропускания 105 МГц по уровню –1 дБ ($\Delta f/f_0$ = 75 %) и пульсациями 0,5 дБ на срезе YX/41° $LiNbO_3$ приведена на рис. 14. Фильтр обеспечил ВП 18 дБ, затухание в полосе задерживания >35 дБ, $К_П$ = 1,15 [22].

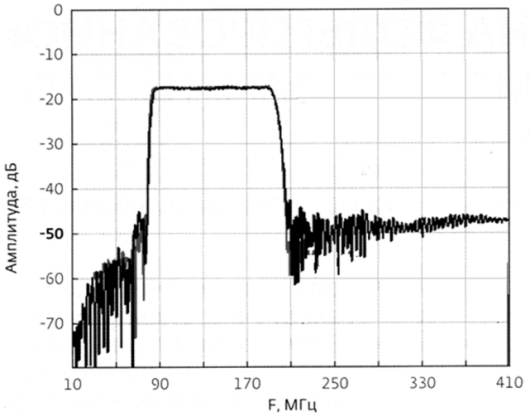


Рис. 14. АЧХ двухпреобразовательного секционированного веерного фильтра на ООНП с неоднородно расщепленными электродами с $\Delta f/f_0$ = 75% на срезе YX/41° $LiNbO_3$ [22]

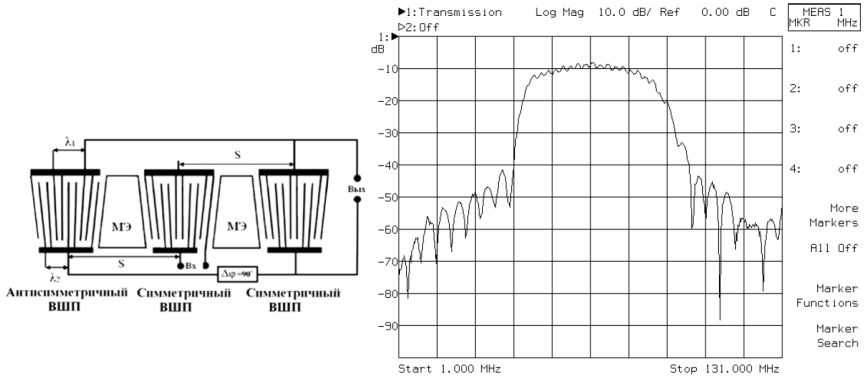


Рис. 15. Топология и АЧХ трехпреобразовательного веерного фильтра с $\Delta f/f_0$ = 60% на срезе YX/41° $LiNbO_3$ [23]

На рис. 15 представлены топология и АЧХ трехпреобразовательного веерного фильтра на f_0 = 65,25 МГц с полосой пропускания 39,5 МГц по уровню –5 дБ ($\Delta f/f_0$ = 60%) и пульсациями <2 дБ на срезе YX/41° $LiNbO_3$. В фильтре выходные преобразователи выполнены с симметричной и антисимметричной конфигурацией электродов, а между выходными веерными ВШП включен фазовращатель (индуктивность) со сдвигом фаз $\Delta\varphi$ = 90° для эффективного подавления СТП и уменьшения пульсаций в полосе пропускания фильтра. Для минимизации потерь на распространение вытекающих ПАВ использованы МЭ и минимальные расстояния между входным и выходными веерными ВШП. Получены ВП 8 дБ, затухание в полосе задерживания >40 дБ при отстройке

±40 МГц от f_0, $К_П$ = 1,47 в тракте 50 Ом с LC-согласованием [23]. Применение в веерных фильтрах других типов акустических волн с большим значением k^2 по сравнению с вытекающими ПАВ позволит еще более расширить их полосу пропускания и уменьшить ВП.

Библиографический список

1. Багдасарян А. С., Гуляев Ю. В., Доберштейн С.А., Синицына Т. В. Техника ПАВ: ближайшие перспективы // Техника радиосвязи. 2017. Вып. 3 (34). С. 72–84.
2. Фильтры на поверхностных акустических волнах (расчет, технология и применение): пер. с англ. / под ред. Г. Мэттьюза. М.: Радио и связь, 1981. С. 421.
3. Орлов В. С., Бондаренко В. С. Фильтры на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1984. С. 39-47.
4. Van de Heuvel A. P. Use of rotated electrodes for amplitude weighting in interdigital surface wave transducers // Applied Phys. Let. 1972. Vol. 21. P. 280–282.
5. Карро-Эст А. Б., Поляков В. В., Рождественский А. Н. Направленность излучения веерного встречно-штыревого преобразователя поверхностных акустических волн // Акустический журнал. 1981. Т. 27, № 4. С. 620–623.
6. Campbell C. K., Yanglin Y. E., Sferazza J. J. Papa, Wide-Band Linear Phase SAW Filter Design Using Slanted Transducer Fingers // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. 1982. Vol. SU-29, № 6. P. 224–228.
7. Solie L. Tapered Transducers – Design and Applications // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1998. P. 27–37.
8. Tsukamoto M. Some Types of SAW Filters Effective for TTE Suppression // Japanese Journal of Applied Physics. 1979. Vol. 18, № 8. P. 1471–1478.
9. Doberstein S. Balanced Wideband Tapered Three-Transducer Low-Loss SAW Filters with Impedance Conversion // Proc. 20th EFTF. 2006. P. 54–57.
10. Доберштейн С. А. Широкополосный фильтр поверхностных акустических волн на основе веерного преобразователя, взвешенного удалением части электродов // Техника средств связи. Серия «Техника радиосвязи». 1985. Вып. 10. С. 97–100.
11. Yatsuda H., Takeuchi Y., Yoshikawa S. New Design for SAW Filters Using Slanted-Finger IDTs // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1990. P. 61–66.
12. Преобразователь поверхностных акустических волн: А.С. 938366 СССР / Багдасарян А. С., Гуляев Ю. В., Кмита А. М. № 2990848/40-23 заявл. 10.10.80, опубл. 23.06.1982. Бюл. № 23.
13. Полосовые фильтры на поверхностных акустических волнах с взвешенными веерными преобразователями / Е. А. Нелин, И. М. Гранкин, В. В. Киселев [и др.] // Журнал технической физики. 1984. Т. 54, вып. 8. С. 390–392.
14. Chvets V. B., Ivanov P. G., Makarov V. M., Orlov V. S. Low-Loss Slanted SAW Filters with Low Shape Factors // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1999. P. 51–54.

15. Optimal Design of Quasi-Slanted SAW Transducer Employing Resonant SPUDT / H. Li, S. He, T. Omori [et al.] // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 2006. P. 180–183.

16. URL: www.alldatesheet.com./datasheet-pdf/pdf/179002/EPCOS/B3677.html (дата обращения: 12.11.2021).

17. Qorvo, Inc.: офиц. сайт. URL: www.qorvo.com/products/p/855653 (дата обращения: 12.11.2021).

18. Vectron International: офиц. сайт. URL: www.vectron.com/products/SASW/pdf_SAW/TFS325E.pdf (дата обращения: 12.11.2021).

19. ООО «БУТИС»: офиц. сайт. URL: www.butis-m.ru//assets/files/pdf/FP3P7-795-9-02.pdf (дата обращения: 12.11.2021).

20. Доберштейн С. А. Широкополосные трехпреобразовательные веерные фильтры на ПАВ с уменьшенными потерями и улучшенной избирательностью // Техника радиосвязи. 2020. Вып. 2 (45). С. 88–94.

21. Very Large Bandwidth IF SAW Filters Using Leaky Waves on $LiNbO_3$ and $LiTaO_3$ / M. E. Hakiki, J-A. Damy, H. Harmann [et al.] // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 2011. P. 1325–1328.

22. Багдасарян А., Синицына Т., Иванов П., Швец В. Частотно-селективные СВЧ-модули на основе преобразователей веерного типа // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 2012. № 2. С. 66–71.

23. Трехпреобразовательный веерный фильтр на поверхностных акустических волнах: пат.208596 Рос. Федерация. Доберштейн С. А. № 20211234482, заявл. 04.08.2021, опубл. 27.12.2021. Бюл. № 36.

УДК 534.8, 535.4

В. И. Балакший*
доктор физико-математических наук, профессор
С. Н. Манцевич*
доктор физико-математических наук, профессор
М. И. Купрейчик*
ведущий электроник
*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КОЛЛИНЕАРНОМ АКУСТООПТИЧЕСКОМ ГЕНЕРАТОРЕ С ОПТИЧЕСКИМ ГЕТЕРОДИНИРОВАНИЕМ

Представлены результаты исследования различных режимов работы оптоэлектронного генератора с коллинеарной геометрией акустооптического взаимодействия, в котором сигнал обратной связи формируется за счет эффекта оптического гетеродинирования. Рассмотрены процессы установления различных типов колебаний в зависимости от коэффициента обратной связи и фазовой расстройки между взаимодействующими световыми пучками. Обсуждаются вопросы возможного применения таких систем.
Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, оптоэлектронный генератор, гибридная обратная связь, коллинеарная дифракция света.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 19-12-00072-П).

V. I. Balakshy*
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor
S. N. Mantsevich*
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor
M. I. Kupreychik*
Leading Electronics Engineer
*M. V. Lomonosov Moscow State University

DYNAMIC PROCESSES IN A COLLINEAR ACOUSTO-OPTIC GENERATOR WITH OPTICAL HETERODYNING

The functioning of an optoelectronic generator based on the collinear geometry of acousto-optic interaction is studied, in which the feedback signal is formed due to the effect of optical heterodyning. The process of establishing different types of oscillations depending on the feedback coefficient and the phase mismatch between interacting light beams is considered. The issues of possible application of such systems are discussed.
Keywords: acousto-optic interaction, optoelectronic generator, hybrid feedback, collinear light diffraction.

Введение

Акустооптические (АО) системы с обратной связью представляют особый класс приборов, отличающихся, во-первых, сильной нелинейностью своих па-

раметров, а во-вторых, наличием эффекта запаздывания сигнала обратной связи. Это определяет большое разнообразие их поведения и дает возможность как для улучшения характеристик известных АО-приборов, так и для создания устройств нового типа [1–6].

В статьях [7–8] была впервые проанализирована работа коллинеарной АО-ячейки в варианте нестандартной геометрии взаимодействия света и ультразвука, когда на выходе формируется световой пучок, промодулированный по интенсивности с частотой ультразвука. Это позволяет путем регистрации выходного излучения создать цепь обратной связи. В дальнейших работах [9–12] исследовалось влияние обратной связи на характеристики АО-коллинеарного фильтра. Было экспериментально показано, что обратная связь существенно меняет вид выходного сигнала системы: увеличивается его амплитуда, исчезают боковые лепестки, а главное – заметно сужается полоса пропускания фильтра.

В данной работе рассмотрен вариант системы без ВЧ-генератора, возбуждающего в коллинеарной АО-ячейки акустические волны, а генерация ультразвука возникает исключительно благодаря положительной обратной связи.

Характеристики коллинеарного АО-генератора

Схема генератора на основе кристалла молибдата кальция ($CaMoO_4$) показана на рис. 1. В отличие от классической схемы коллинеарного фильтра [13; 14], здесь поляризатор П задает входную поляризацию оптического излучения под углом $\alpha = 45°$ к кристаллографическим осям кристалла *Y* и *Z*. Поэтому, входя в кристалл, свет распадается на две компоненты, поляризованные по осям *Y* и *Z*. Каждая компонента независимо дифрагирует в +1-й и –1-й порядки дифракции. Выходной поляризатор А, ориентированный под углом $\beta = 0°$ или $90°$, выделяет компоненты с одинаковой поляризацией, которые интерферируют на входе фотоприемника ФП. Биения этих компонент формируют на выходе приемника электрический сигнал, который, помимо постоянной составляющей, содержит переменную гармоническую компоненту с частотой *f*, определяемой условием АО-фазового синхронизма: $f = (n_e - n_o)V/\lambda$, где n_o и n_e – показатели преломления оптических мод кристалла, *V* – скорость ультразвука, а λ – длина волны света. Сигнал с приемника через блок обратной связи, включающий усилитель и фазовращатель, подается на пьезопреобразователь ПП. При выполнении условий баланса фаз и амплитуд в системе возбуждаются колебания. Расчет системы выполнен методом компьютерного моделирования. При этом на преобразователе АО ячейки вначале задавался малый (шумовой) сигнал, рассчитывался результат дифракции на нем светового пучка, а затем выходной сигнал фотоприемника использовался в качестве напряжения на преобразователе на следующем этапе расчета. Расчет выполнен для АО-ячейки из кристалла $CaMoO_4$, описанной в экспериментах [9–12], с характеристиками: длина по оси X–$l = 4$ см, скорость ультразвука $V = 2{,}9 \cdot 10^5$ см/с, показатели преломления – $n_o = 1{,}991$ и $n_e = 2{,}001$ на длине волны света $\lambda = 632{,}8$ нм. При

этих параметрах частота АО-синхронизма равна $f = 46$ МГц, а постоянная времени ячейки $\tau = l/V = 13{,}7$ мкс.

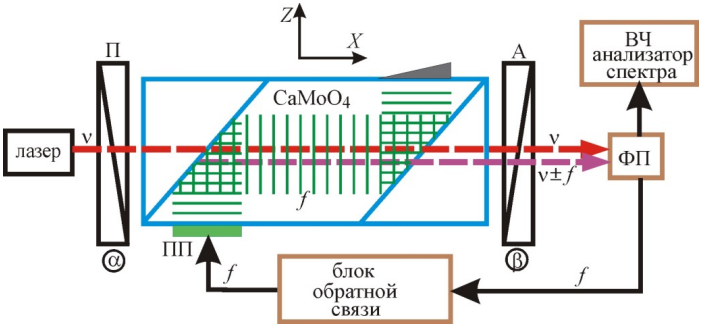


Рис. 1. Схема коллинеарного акустооптического генератора

Исследования показали, что в зависимости от параметров системы в ней могут возбуждаться различные виды колебаний: гармонические с постоянной амплитудой и частотой, определяемой условием фазового синхронизма (рис. 2, *а*), автомодуляционные (рис. 2, *б*) и даже хаотические (рис. 2, *в*). На рис. 2 показан процесс установления амплитуды колебаний; безразмерное время $T = 5$ соответствует реальному времени 137 мкс. Безразмерная интенсивность падающего света принята равной единице, поэтому амплитуда $\Gamma = 0{,}5$ означает 100%-ю эффективность дифракции.

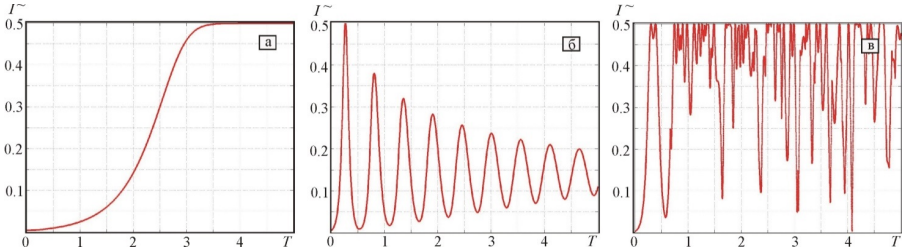


Рис. 2. Форма колебаний при разной величине коэффициента обратной связи: K = 3 (а), K = 10 (б) и K = 20 (в)

Особенность рассматриваемой системы заключается в том, что при подаче на ее вход оптического излучения с различными спектральными компонентами (например, ν_1 и ν_2) каждая компонента будет возбуждать акустическую волну со своей частотой f_1 и f_2. Таким образом, система будет преобразовывать оптические частоты в частоты радиодиапазона. Это означает, что с помощью обычного анализатора спектра радиодиапазона можно измерять спектр оптического излучения. При этом естественно возникает вопрос о спектральном раз-

решении устройства, поскольку возможны перекрестные помехи при регистрации. Например, световое излучение с частотой ν_2 будет дифрагировать на акустической волне, создаваемой частотой ν_1.

Указанный негативный эффект иллюстрирует рис. 3. Здесь по оси абсцисс отложено время установления колебаний, а по оси ординат – значения $I_1^{\sim}$ и $I_2^{\sim}$, которые показывают нормированные амплитуды интенсивности для двух частот оптического излучения: частоты ν_1, которая находится в синхронизме с создаваемой ею акустической волной, и частоты ν_2, которая дифрагирует с расстройкой $R = \pi$. Расстройка $R = \pi$ обычно используется для оценки полосы пропускания АО-фильтра; она соответствует уменьшению эффективности дифракции на краю полосы пропускания до уровня 0,4 [14]. Кривой ς представлено отношение $\varsigma = I_1^{\sim} / I_2^{\sim}$. Эта величина позволяет оценить спектральную избирательность рассматриваемой системы по сравнению с классическими АО-фильтрами. Из графика следует, что максимальное значение ς для выбранных параметров расчета равно 24, что на порядок больше, чем в обычном варианте.

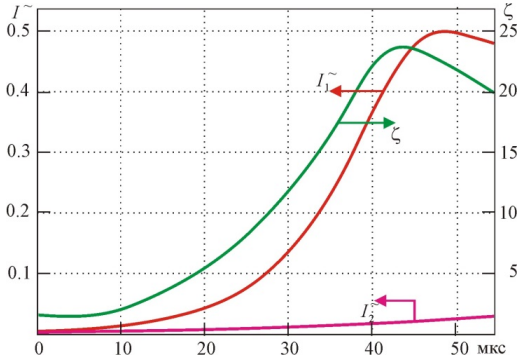


Рис. 3. Возбуждение колебаний в случае спектральных компонент с частотами ν_1 *и* ν_2

Заключение

Исследованы особенности работы оптоэлектронного генератора на основе коллинеарного АО-взаимодействия в кристалле молибдата кальция, в котором сигнал обратной связи возникает за счет эффекта оптического гетеродинирования. Показана возможность применения этого устройства для преобразования спектра оптического излучения в радиодиапазон с последующим измерением спектра с помощью радиоспектрометра.

Библиографический список

1. Балакший В. И., Казарьян А. В., Молчанов В. Я. Бистабильные режимы в акустооптической системе с обратной связью // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37, № 6. С. 1140–1144.

2. Balakshii V. I., Kazaryan A. V., Lee A. A. Multistability in an acousto-optical system with a frequency feedback // Quant. Electron. 1995. Vol. 25, № 10. P. 940–944.

3. Balakshy V. I., Kuznetsov Yu. I. Optoelectronic systems with delayed acousto-optic feedback // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8306. P. 83060W: 1–7.

4. Balakshy V. I., Kuznetsov Yu. I., Mantsevich S. N., Polikarpova N. V. Dynamic processes in an acousto-optic laser beam intensity stabilization system // Optics & Laser Techn. 2014. Vol. 62. P. 89–94.

5. Balakshy V. I., Kazaryan A. V. Laser beam direction stabilization by means of Bragg diffraction // Opt. Eng. 1999. Vol. 38, № 7. P. 1154–1159.

6. Balakshy V. I., Emelianov S. V. Laser-like acousto-optic generator // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4514. P. 82–89.

7. Balakshy V. I., Mantsevich S. N. Influence of light polarization on characteristics of a collinear acoustooptic diffraction // Optics & Spectroscopy. 2009. Vol. 106, № 3. P. 441–445.

8. Balakshy V. I., Mantsevich S. N. Polarization effects at collinear acousto-optic interaction // Optics & Laser Techn. 2012. Vol. 44, № 4. P. 893–898.

9. Balakshy V. I., Kuznetsov Yu. I., Mantsevich S. N. Effect of optoelectronic feedback on the characteristics of acousto-optic collinear filtering // Quant. Electron. 2016. Vol. 46, № 2. P. 181–184.

10. Mantsevich S. N., Balakshy V. I., Kuznetsov Yu. I. Acousto-optic collinear filter with optoelectronic feedback // Appl. Phys. B: Lasers and Optics. 2017. Vol. 123, № 4. P. 1–8.

11. Mantsevich S. N., Balakshy V. I. Examination of optoelectronic feedback effect on collinear acousto-optic filtration // J. Opt. Soc. Amer. B: Opt. Phys. 2018. Vol. 35, № 5. P. 1030–1039.

12. Mantsevich S. N., Balakshy V. I. Collinear acousto-optic filtration with electronically adjustable transmission function // IEEE Photonics J. 2019. Vol. 11, № 2. P. 1–15.

13. Harris S. E., Nieh S. T. K., Fiegelson R. S. $CaMoO_4$ electronically tunable optical filter // Appl. Phys. Letts.1970. Vol. 17, № 5. P. 223–225.

14. Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.

УДК 621.396

О. Л. Балышева
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ПАВ И ОАВ: ИНТЕГРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Необходимость улучшения технических характеристик акустических резонаторов и фильтров на их основе связана с интеграцией ПАВ- и ОАВ-технологий. Обсуждаются предпосылки и возможности развития гибридной акустической технологии ПАВ/ОАВ с использованием универсальных многослойных подложек с тонкими пьезоэлектрическими пленками.
Ключевые слова: поверхностные акустические волны, объемные акустические волны, резонаторы, подложки, многослойные структуры, тонкие пьезоэлектрические пленки.

O. L. Balysheva
PhD, Tech., Associate Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SAW AND BAW: INTEGRATION OF ACOUSTIC TECHNOLOGIES

The need to improve the technical characteristics of acoustic resonators and filters based on them is related to the integration of SAW and BAW technologies. The driving factors and possibilities of developing a hybrid acoustic SAW/BAW technology using universal multilayer substrates with thin piezoelectric films are discussed.
Keywords: surface acoustic waves, bulk acoustic waves, resonators, substrates, multilayer structures, piezoelectric thin films.

Введение

В последние несколько десятилетий стремительное развитие беспроводных телекоммуникационных систем, таких как системы мобильной сотовой и спутниковой связи, системы передачи данных, глобальные системы позиционирования, связано с повышенными требованиями к устройствам частотной фильтрации. Акустические технологии поверхностных акустических волн (ПАВ) и объемных акустических волн (ОАВ) являются предпочтительными технологиями радиочастотной фильтрации благодаря одновременному сочетанию отличных электрических характеристик, миниатюрности и низкой стоимости. Для акустических фильтров характерны высокий Q-фактор, малые вносимые потери, хорошее внеполосное подавление и возможность реализации частотных характеристик с высокой степенью прямоугольности.

Классическое разделение на ПАВ и ОАВ определяется способом генерации акустических волн и соответствующим взаимным размещением пьезоэлектрического материала и электродов. ПАВ, распространяющиеся вдоль поверхности пьезоэлектрического материала, возбуждаются электродной структурой преобразователя, размещенного на поверхности материала. ОАВ распространяются в направлении толщины пьезоэлектрического материала и возбуждают-

ся с помощью электродов, расположенных на верхней и нижней сторонах пьезоматериала.

Развитие современных устройств частотной фильтрации предусматривает использование высокочастотных акустических резонаторов с высоким Q-фактором, большим коэффициентом электромеханической связи (КЭМС) и хорошей температурной стабильностью.

Традиционно ПАВ-фильтры показывают преимущества перед фильтрами на ОАВ на частотах менее 2–2,5 ГГц. Более низкая стоимость ПАВ-фильтров объясняется более простым процессом литографии. Как правило, ПАВ-технология требует около 4 слоев масок и осаждения металла. Для технологии ОАВ необходимо 9–13 слоев масок и несколько слоев осаждения металла. Достоинством ПАВ-резонаторов служит планарная технология изготовления вместе с простым масштабированием по частоте за счет изменения шага электродной структуры, а недостатком являются низкие значения КЭМС и добротности с ростом рабочих частот.

На частотах выше 2,5 ГГц изготовление ПАВ-резонаторов усложняется, и они уступают свои преимущества. На средних и высоких частотах диапазона более 2,5 ГГц преимуществом резонаторов на ОАВ перед резонаторами на ПАВ служит больший потенциал получения высококачественных фильтров благодаря более низким вносимым потерям и лучшей избирательности [1]. Кроме того, ОАВ-резонаторы выдерживают большую мощность и имеют лучшую температурную стабильность.

Наряду с успешным развитием каждой из технологий и существующими отличиями, тенденцией последних лет являются их взаимное проникновение и интеграция. Интеграция отдельных компонентов, изготовленных по ПАВ- и ОАВ-технологиям, в одном корпусе (например, в гибридных ПАВ- и ОАВ-антенных дуплексорах) или интеграция ПАВ- и ОАВ-резонаторных структур на единой подложке [2] существуют на протяжении ряда лет и продолжают развиваться. Следующим шагом объединения двух технологий можно считать появление гибридных ПАВ/ОАВ-резонаторных структур, осуществляющих генерацию ПАВ и ОАВ с трансформацией объемных волн в поверхностные.

Предпосылки интеграции акустических технологий

Основой взаимного проникновения двух акустических технологий стали как достижения в области пьезоэлектрических материалов и процесса изготовления подложек, так и необходимость удовлетворения постоянно растущих требований к параметрам акустических резонаторов.

Предпосылками интеграции технологий ПАВ и ОАВ служат такие факторы, как: одинаковые используемые пьезоматериалы и появление универсальной подложки, пригодной для создания ПАВ- и ОАВ-структур. Обе технологии имеют одни и те же качественные показатели и направления совершенствования технических характеристик реализуемых устройств, а также сходные проблемы.

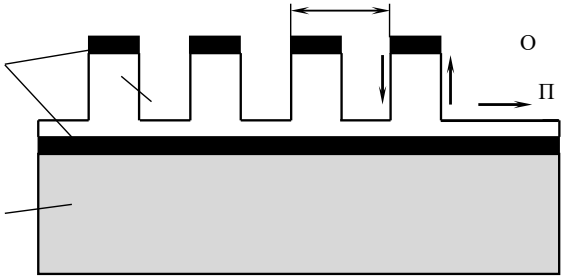
Наиболее распространенными пьезоматериалами, применяемыми в промышленном производстве фильтров на ПАВ и ОАВ, служат нитрид алюминия (и нитрид алюминия-скандия), ниобат лития и танталат лития. Распространение нитрида алюминия обусловлено высокими скоростями акустических волн и малым температурным коэффициентом частоты. Малый КЭМС этого материала повышается при легировании скандием. Ниобат и танталат лития за счет наилучшего сочетания основных качественных показателей стали промышленно одобренными материалами для акустических технологий.

Среди тенденций последних лет, характерных как для ПАВ, так и для ОАВ, можно выделить уход от «чистых» мод и использование мод высших порядков, с более высокими скоростями и так называемых квазиПАВ и квазиОАВ. Важнейшими проблемами, свойственными устройствам, изготовленным по обеим технологиям, остаются температурная компенсация, подавление паразитных мод, невозможность одновременного повышения КЭМС и Q-фактора с повышением рабочих частот, существенный рост потерь на высоких частотах, а также проблемы миниатюризации и интеграции с пассивными и активными компонентами, изготовленными по другим (в том числе не по акустическим) технологиям. Существенным фактором, ограничивающим продвижение обоих типов акустических резонаторов в область частот до 6 ГГц, оказывается значительный рост потерь.

Основным движущим фактором интеграции ПАВ и ОАВ стало появление универсальных инженерных многослойных подложек, изготовленных по смарт-технологии с помощью техники переноса тонких пьезоэлектрических слоев монокристалла на базовую непьезоэлектрическую основу [3]. Многослойные подложки в сочетании со структурным травлением пьезоэлектрической пленки между соседними элементами электродной структуры привели к формированию на подложках столбиков, каждый из которых фактически является ОАВ-резонатором, а многоэлементная периодическая система столбиков обеспечивает возбуждение ПАВ [4].

Гибридные ПАВ/ОАВ-резонаторы

На рисунке изображена структура гибридного ПАВ/ОАВ-преобразователя [5]. В его основе лежит совмещение на слоистой подложке структур, возбуждающих ПАВ и ОАВ, и обеспечение трансформации ОАВ в ПАВ. На основную непьезоэлектрическую подложку (1) наносится слой металла (2) и тонкая пьезоэлектрическая пленка (3), также покрываемая металлом (2). Многослойные пленочные подложки в сочетании со структурным травлением пьезоэлектрической пленки [4] привели к формированию столбиков пьезоэлектрического материала, покрытых металлом, каждый из которых работает как объемный резонатор. Столбики расположены с периодом (p), соответствующим длине возбуждаемой на поверхности подложки ПАВ. Преимуществом предложенной конструкции является увеличение КЭМС, величину которого можно регулировать глубиной травления [6].



Структура гибридного ПАВ/ОАВ-резонатора: 1 – основная подложка (кремний или сапфир); 2 – металл; 3 – нитрид алюминия (AlN) [5]

Полученные экспериментальные результаты [5; 7] подтверждают работоспособность конструкции гибридного резонатора и возможность улучшения частотных характеристик. Однако дальнейшее развитие и в особенности перспективы промышленного производства устройств с гибридными ПАВ/ОАВ-структурами, по-видимому, будут определяться исходом компромисса между достигаемыми улучшениями характеристик и возрастающей сложностью технологического процесса.

Заключение

Наряду с существующими различиями ПАВ- и ОАВ-технологий, такие факторы, как совершенствование процесса нанесения тонких пьезоэлектрических пленок, развитие техники прямого соединения слоев различных материалов, структурное травление пьезоэлектрических пленок, появление универсальных многослойных подложек, привели к дальнейшей интеграции двух акустических технологий и появлению гибридных ПАВ/ОАВ-резонаторных структур. Объединение резонаторных структур с использованием волновой природы как ПАВ, так и ОАВ позволяет улучшить частотные характеристики проектируемых акустических устройств, однако сопровождается усложнением процесса изготовления.

Библиографический список

1. Materials, Design, and Characteristics of Bulk AcousticWave Resonator: A Review / Y. Liu, Y. Cai, Y. Zhang [et al.] // Micromachines. 2020. Vol. 11. P. 630.
2. Sarvardhapu K., Sai Krishna G. Hybrid FBAR Resonator Using ZNO Patterns and Study using 2D FEM Simulation // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2019. Vol. 8, iss. 4. P. 1393–1396.
3. LiNbO3 Single Crystal Layer Transfer Techniques for High Performances RF Filters / C. Deguet, M. Pijolat, N. Blanc [et al.] // ECS Transactions. 2010. Vol. 33 (4). P. 225–232.

4. Enhanced Coupling Coefficient in Dual-Mode ZnO/SiC Surface AcousticWave Devices with Partially Etched Piezoelectric Layer / H. Xu, S. Fu, R. Su [et al.] // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. P. 6383.

5. Effective SAW excitation on non-piezoelectric substrate using AlScN piezoelectric thin film BAW/SAW hybrid transducer / V. Pashchenko, F. Parsapour, S. Ballandras [et al.] // Proc. 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). 2017. P. 1–3.

6. Hybrid BAW/SAW AlN and AlScN Thin Film Resonator. First Experimental data / V. Pashchenko, R. Matloub, F. Parsapourkolour [et al.] // Proc. of 2016 IEEE Ultrasonic Symposium, Tours.

7. High quality factor Hybrid SAW/BAW resonators / S. Barsoum, C. Hellion, E. Vermande [et al.] // EFTF/IFCS 2022 – Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium. Paris, 2022. P. 1–4.

УДК 534.535

В. Н. Белый*
доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН Беларуси
П. А. Хило**
доктор физико-математических наук, профессор
Н. А. Хило*
кандидат физико-математических наук, доцент
П. И. Ропот*
кандидат физико-математических наук, доцент
С. В. Кулаков**
доктор технических наук, профессор
*Институт физики НАН Беларуси
**Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого
***Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЕССЕЛЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В КРИСТАЛЛЕ $LiBi(MoO_4)_2$

Исследованы особенности анизотропной акустооптической (АО) дифракции бесселева светового пучка (БСП) на поперечно-поляризованной плоской акустической волне в кристалле $LiBi(MoO_4)_2$ тетрагональной симметрии класса 4/m. Предложена новая оптическая схема АО-дифракции, в которой БСП формируется внутри кристалла из кольцевого падающего пучка. Построена резонансная кривая, и рассчитана эффективность дифракции БСП ограниченного диаметра.
Ключевые слова: бесселевы световые пучки, акустооптическая дифракция, акустооптический модулятор.

V. N. Belyi*
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus
P. A. Khilo**
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor
N. A. Khilo*
PhD, Phys.-Math., Associate Professor
P. I. Ropot*
PhD, Phys.-Math., Associate Professor
S. V. Kulakov**
Dr. Sc., Tech., Professor
*Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
**Sukhoi State Technical University of Gomel
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ACOUSTO-OPTIC INTERACTION OF BESSEL LIGHT BEAMS IN THE $LiBi(MoO_4)_2$ CRYSTAL

The features of anisotropic acousto-optic (AO) diffraction of a Bessel light beam (BLB) on the transversely polarized plane acoustic wave in the $LiBi(MoO_4)_2$ crystal of tetragonal symmetry of the 4/m class are investigated. A new optical scheme of AO diffraction is proposed, in which BLB is formed inside a crystal from an annular incident beam. Resonance curve is constructed and diffraction efficiency of BLB with a limited diameter is calculated.
Keywords: bessel light beams, acousto-optic diffraction, acousto-optic modulator.

В данной работе исследуются особенности акустооптической (АО) дифракции бесселева светового пучка (БСП) в кристалле висмут-лития молибдата $LiBi(MoO_4)_2$. Физические свойства этих кристаллов делают их перспективными для применения в акустооптике. Для осуществления АО-дифракции с участием БСП была выбрана поперечная акустическая мода, позволяющая реализовать режим анизотропной дифракции.

Геометрия акустооптического взаимодействия

На рис. 1 показано расположение волновых векторов бесселева светового пучка и акустической волны. Окружность относится к обыкновенной волне (индекс *o*), эллипс расположен внутри круга ($n_e < n_o$) и относится к необыкновенной плоской волне (индекс *e*). В случае анизотропной e→o дифракции падающий пучок является ТН-поляризованным (или e-пучком). Для его описания используется модель векторного бесселева пучка [1; 2]. Парциальный волновой вектор $k_{e,in}$ падающего пучка, лежащий в плоскости (x, z) оптической оси, показан на рис. 1.

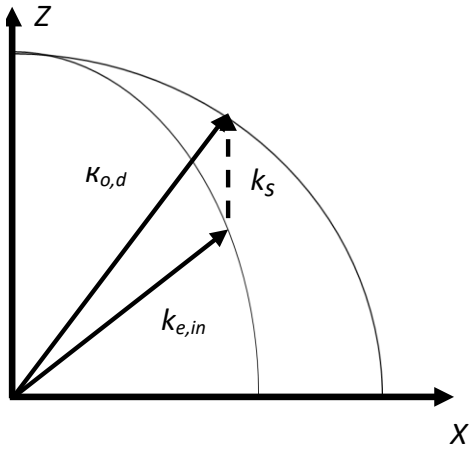


Рис. 1. Сечение поверхности волновых векторов одноосного оптически отрицательного кристалла главной плоскостью XZ и векторная диаграмма АО-дифракции БСП на акустической волне: $k_{e,in}$ – волновой вектор падающего БСП, k_{od} – волновой вектор дифрагированного БСП, k_s – волновой вектор акустической волны

Волновой вектор $k_{o,d}$ относится к дифрагированному БСП, а вектор k_s – к акустической плоской волне. В рассматриваемой геометрии падающий и дифрагированный БСП, а также акустическая волна распространяются в положительном направлении оси Z.

Уравнения векторного синхронизма для АО-взаимодействия с участием БСП формально совпадают с соответствующими уравнениями для плоских волн, т. е. имеют вид:

$$\vec{k}_e + \vec{k}_s = \vec{k}_{d,o}. \qquad (1)$$

С помощью формулы (1) рассчитана зависимость между углом γ конуса падающего БСП и частотой двух акустических мод, необходимая для реализации синхронного АО-взаимодействия в кристалле $NaBi(MoO_4)_2$ (рис. 2).

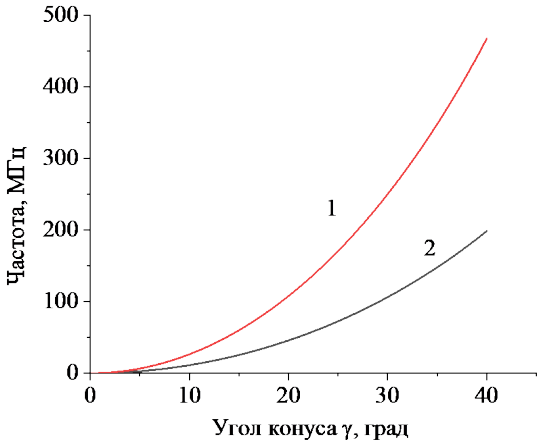


Рис. 2. Зависимость частоты акустической волны для е–о-взаимодействия в кристалле $LiBi(MoO_4)_2$ от угла конуса падающего БСП для продольно- (индекс 1) и поперечно- (индекс 2) поляризованных акустических мод при λ = 0,63 мкм, n_o = 2,368, n_e = 2,255, $v_1 = 3{,}9 \cdot 10^3$ м/с, $v_2 = 1{,}7\ 10^3$ м/с

Так как поглощением акустических волн в кристаллах $NaBi(MoO_4)_2$ и $LiBi(MoO_4)_2$ можно пренебречь только до частот не более 200 МГЦ, то из рис. 2 следует, что эффект поглощения ограничивает сверху допустимые углы конуса БСП.

Тензор диэлектрической проницаемости для АО-дифракции бесселевых световых и акустической волн

Изменение тензора диэлектрической проницаемости Δε для рассматриваемого е→о типа АО-дифракции имеет следующие ненулевые компоненты:

$$\Delta\varepsilon_{\phi,z} = -i\frac{1}{4}\varepsilon_o\varepsilon_e u_0 k_s (p_{44} - ip_{45})\exp(i\phi),$$
$$\Delta\varepsilon_{\rho,z} = -i\frac{1}{4}\varepsilon_o\varepsilon_e u_0 k_s (p_{45} - ip_{44})\exp(i\phi), \qquad (2)$$

где p_{44}, p_{45} – компоненты тензора фотоупругости. Из (2) следует, что падающий БСП порядка m при АО-взаимодействии будет рассеиваться в бесселев пучок порядка $m + 1$.

При использовании продольной акустической волны индуцируются диагональные компоненты тензора $\Delta\varepsilon$: $\Delta\varepsilon_{\rho\rho}, \Delta\varepsilon_{\phi\varphi}, \Delta\varepsilon_{zz}$, т. е. становится возможной изотропная дифракция типа e→e, или o→o. Такие типы дифракции представляют интерес в связи с возможностью повышения эффективности АО-преобразования вследствие взаимодействия одинаковых по пространственной структуре световых пучков. Данная геометрия взаимодействия может быть реализована при обратном рассеянии БСП [1], но требует применения акустических волн с частотой несколько гигагерц. Это, однако, затруднительно из-за сильного поглощения акустического поля. Возможен и второй способ реализации изотропной АО-дифракции, который требует перехода к бесселевым акустическим пучкам [2].

Эффективность дифракции бесселева светового пучка

Укороченные уравнения для АО-дифракции с участием БСП и плоской акустической волны имеют вид:

$$\frac{dA^o_{m+1}}{dz} = i\chi^{oe}_{m+1,m}A^e_m \exp\left(-i\Delta k_z z\right), \quad \frac{dA^e_m}{dz} = i\chi^{eo}_{m,m+1}A^o_{m+1}\exp\left(i\Delta k_z z\right). \qquad (3)$$

Здесь A^e_m и A^o_{m+1} – амплитуды проходящего и дифрагированного БСП, Δk_z – волновая расстройка. Параметры акустооптической связи $\chi^{oe}_{m,n}$ содержат интегралы перекрытия компонент падающего и дифрагированного БСП. Решение уравнений (3) позволяет рассчитать эффективность дифракции η (рис. 3). Расчет проведен для кристалла $LiBi(MoO_4)_2$ на длине волны λ = 0,63мкм. Использованы следующие значения компонент тензора упругости [3]: $c_{44} = 16{,}03\cdot10^{10}$ Па, $c_{11} = 94{,}67\cdot10^{10}$ Па, $c_{33} = 67{,}51\cdot10^{10}$ Па, $c_{13} = 29{,}05\cdot10^{10}$ Па, $c_{12} = 40{,}93\cdot10^{10}$ Па, $c_{66} = 23{,}07\cdot10^{10}$ Па $c_{16} = -8{,}23\cdot10^{10}$ Па, $\rho = 5{,}67\cdot10^3$кг/м^3. Диаметр светового БСП равен 6 мм, угол конуса 10 град, длина взаимодействия 1,8 см и соответствовала бездифракционной длине падающего БСП. Акустическая волна имела частоту 50 МГц, мощность 1 Вт.

Из рис. 3 следует, что эффективность дифракции в максимуме более 80%, а угловая ширина резонансной кривой по уровню 0,5 равна примерно 0,1 мрад. Так как падающий БСП диаметром 6 мм имеет ширину углового спектра также около 0,1 мрад, то в целом реализуется высокая эффективность дифракции БСП.

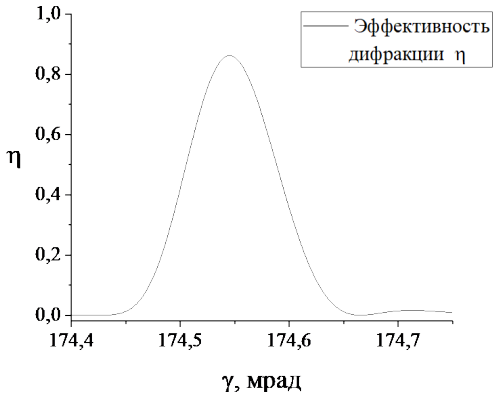


Рис. 3. Зависимость эффективности АО-дифракции бесселева светового пучка на плоской акустической волне от угла конуса γ дифрагированного БСП

На рис. 4 показан вариант оптической схемы для реализации АО-дифракции бесселева светового пучка на плоской акустической волне.

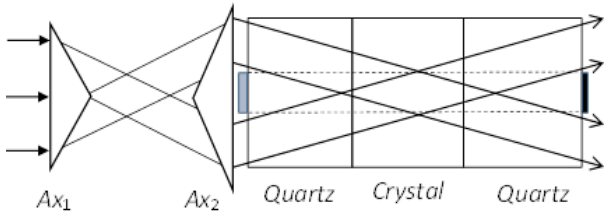


Рис. 4. Оптическая схема, позволяющая реализовать АО дифракцию БСП на плоской акустической волне

Здесь два аксикона Ax_1 и Ax_2 трансформируют входной гауссов пучок в кольцевой конический пучок в плоскости пьезопреобразователя. Пьезопреобразователь расположен не на кристалле, а на вспомогательной пластине, например, из плавленого кварца. Эта пластина находится в акустическом контакте с кристаллом $LiBi(MoO_4)_2$ и имеет толщину, достаточную для локализации кристалла в области существования бесселева пучка (ромб на рис. 4). Вторая пластина кварца предназначена для установки поглотителя акустического пучка. Проходящее и дифрагированное поля в виде кольцевых конических пучков выводятся из второй вспомогательной пластины. При необходимости конический пучок на выходе можно преобразовать в осевой, применяя дополнительный аксикон.

Таким образом, в работе проведен расчет е–о-типа дифракции БСП на поперечно-поляризованной плоской акустической волне в кристалле

$LiBi(MoO_4)_2$. Предложена новая оптическая схема АО-дифракции, в которой БП формируется внутри кристалла из кольцевого падающего пучка. Численные оценки показывают возможность достижения высокой эффективности дифракции.

Библиографический список

1. Belyi V. N., Khilo P. A., Kazak N. S., Khilo N. A. Generation of TH- and TE-polarized Bessel light beams at acousto-optic interaction in anisotropic crystals // Opt. commun. 2014. Vol. 325. P. 84–91.

2. Belyi V. N., Khilo P. A., Kazak N. S., Khilo N. A. Transformation of phase dislocations under acousto-optic interaction of optical and acoustical Bessel beams // J. Opt. 2016. №. 7. P. 074002–08.

3. Mazur M. M., Pavlyuk A. A., Ryabinin A. V. Acoustic and Optical Properties of a $LiBi(MoO_4)_2$ Crystal // Inorganic Materials. 2021. Vol. 57, № 4. P. 372–376.

УДК 534.535

В. Н. Белый*
доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН Беларуси
Н. А. Хило*
кандидат физико-математических наук, доцент
О. В. Шакин**
доктор технических наук, профессор
П. А. Хило**
доктор физико-математических наук, профессор
*Институт физики НАН Беларуси
**Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
***Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

БЕССЕЛЕВЫ АКУСТИЧЕСКИЕ ПУЧКИ В ПОПЕРЕЧНО АНИЗОТРОПНЫХ ТЕТРАГОНАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Исследовано влияние поперечной анизотропии на фазовую скорость и состояние поляризации плоских акустических волн в кристаллах класса 4/m. Для последующего анализа влияния анизотропии на бесселевы акустические пучки (БАП) используется модель БАП как когерентной суперпозиции плоских волн с волновыми векторами, лежащими на конической поверхности. Это позволяет исследовать ряд свойств БАП, используя относительно простые решения уравнений Кристоффеля для плоских волн. Показано, что деструктивное влияние анизотропии всегда возрастает с увеличением угла конуса и наиболее сильно сказывается на БАП, сформированных из квазипоперечных плоских волн. В то же время влияние анизотропии на БАП, сформированных из плоских волн с квазипродольной поляризацией, значительно слабее.
Ключевые слова: бесселевы акустические пучки, уравнения Кристоффеля, анизотропный кристалл.

V. N. Belyi*
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus
N. A. Khilo*
PhD, Phys.-Math., Associate Professor
O. V. Shakin**
Dr. Sc., Tech., Professor
P. A. Khilo**
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor
*Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
***Sukhoi State Technical University of Gomel

BESSEL ACOUSTIC BEAMS IN TRANSVERSELY ANISOTROPIC TETRAGONAL CRYSTALS

The influence is investigated of transverse anisotropy on phase velocity and polarization state of plane acoustic waves in 4/m class crystals. For further analysis of the influence of anisotropy on Bes-

sel acoustic beams (BAB) the model of BAB is used as a coherent superposition of plane waves with wave vectors lying on the conical surface. This allows studying a number of BAB features using relatively simple solutions of the Christoffel equations for plane waves. It is shown that destructive influence of anisotropy always increases with the growth in cone angle and most strongly affects BAB formed from quasi-transverse plane waves. At the same time the influence of anisotropy on BAB formed from plane waves with quasi-longitudinal polarization is much weaker.
Keywords: Bessel acoustic beams, Christoffel equations, anisotropic crystal.

Актуальной задачей современной акустооптики (АО) является исследование закономерностей распространения и взаимодействия ультразвуковых и световых волн в анизотропных кристаллах. Эта задача относительно просто решается применительно к плоским акустическим и световым волнам, но усложняется при переходе к акустическим пучкам, в особенности к бесселевым (БАП).

В данной работе проводится исследование данной проблемы для случая, когда БАП распространяется в кристалле тетрагональной симметрии вдоль оси 4-го порядка. Несмотря на распространение вдоль оси симметрии кристалла, в нем проявляется акустическая анизотропия, в том числе в поперечной плоскости. Поперечная анизотропия приводит к зависимости фазовой скорости парциальных плоских волн от азимутальной координаты, что является причиной искажений БАП в сравнении с распространением в поперечно изотропных средах [1; 2].

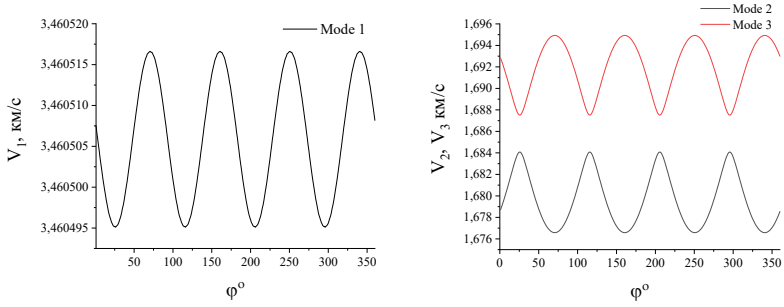
Распространение парциальной плоской волны в декартовой системе координат описывается следующей системой алгебраических уравнений Кристоффеля:

$$\begin{pmatrix} \Gamma_{11}-\rho V^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22}-\rho V^2 & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33}-\rho V^2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix}=0. \qquad (1)$$

Здесь $\Gamma_{il} = c_{ijkl}n_jn_k$ – компоненты тензора Кристоффеля, n_i – компоненты единичного вектора в направлении волновой нормали, c_{ijkl} – компоненты тензора упругости, u_k – компоненты вектора упругого смещения. В цилиндрических координатах нормаль к волновому фронту волны имеет компоненты: $n_1=\sin\gamma\cos\varphi$, $n_2=\sin\gamma\sin\varphi$; $n_3=\cos\gamma$.

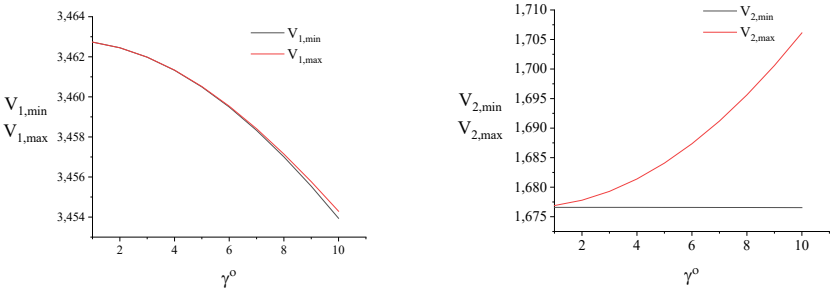
Условие равенства нулю определителя системы (1) приводит к кубическому уравнению относительно переменной $x=\rho V^2$, три корня которого были рассчитаны по известным формулам Кордано. Это позволило получить картину распределения фазовых скоростей трех мод в плоскости (γ, φ) в кристалле (рис. 1).

Как видно из рис. 1, имеется периодическая модуляция фазовой скорости, что является следствием поперечной анизотропии кристалла. Зависимость глубины модуляции от угла конуса для мод 1 и 2 показана на рис. 2. Анизотропия мод 3 и 2 почти совпадают.



а *б*

Рис. 1. Скорость распространения трех акустических мод в кристалле $NaBi(MoO_4)_2$ в зависимости от азимутального угла φ. Угол конуса равен 5°



а *б*

Рис. 2. Зависимость минимальной и максимальной скоростей мод 1 (а) и 2 (б) от угла γ

Зависимость фазовой скорости от азимутального угла вызывает фазовое рассогласование парциальных плоских волн в БАП и определяет длину неразрушающего распространения L пучка. Эта длина рассчитывалась из формулы $\left(\Omega/V_{\min} - \Omega/V_{\max}\right)L = \pi/6$, где Ω – угловая частота и представлена в таблице.

Зависимость длины неразрушающего распространения трех бесселевых акустических мод в кристалле $NaBi(MoO_4)_2$. Угловая частота Ω равна 100 МГц

γ, град	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L_1, *m*	1847	115,2	22,7	7,2	2,9	1,4	0,75	0,44	0,27	0,18
L_2, *cm*	4,89	1,22	0,54	0,31	0,20	0,14	0,10	0,08	0,06	0,05
L_3, *cm*	4,89	1,23	0,55	0,31	0,20	0,14	0,11	0,08	0,07	0,06

Для исследования состояния поляризации парциальных плоских волн из системы уравнений (1) были найдены отношения поперечных и продольной компонент вектора упругого смещения $u_{j,x}/u_{j,z}$ и $u_{j,y}/u_{j,z}$ в декартовых и цилиндрических координатах:

$$u_{j,\rho} = u_{j,x}\cos(\varphi) + u_{j,y}\sin(\varphi);\ u_{j,\varphi} = -u_{j,x}\sin(\varphi) + u_{j,y}\cos(\varphi). \qquad (2)$$

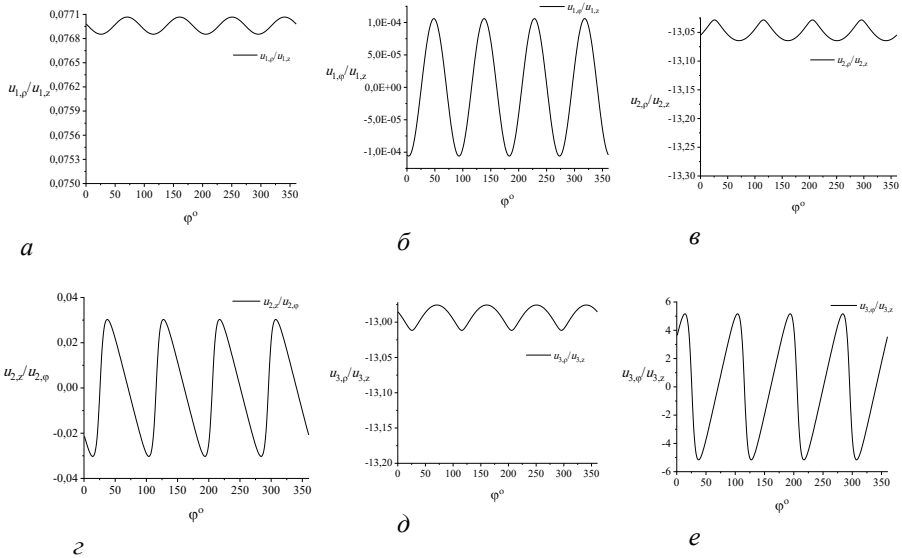


Рис. 3. Зависимости отношения радиальной и азимутальной компонент трех акустических мод к продольной компоненте от азимутального угла. Угол конуса равен 5°

На рис. 3 показаны азимутальные зависимости отношения компонент $u_{j,\rho}/u_{j,z}$ и $u_{j,\varphi}/u_{j,z}$ трех акустических мод. Эти зависимости содержат существенную информацию о пространственной структуре соответствующих бесселевых пучков. Для ее нахождения используем аппроксимацию кривых на рис. 3 следующими формулами:

$$\frac{u_{1,\rho}}{u_{1,z}} \approx \mu_{1,\rho z};\quad \frac{u_{1,\varphi}}{u_{1,z}} \approx \mu_{1,\varphi z}\sin(4\varphi - \Delta\varphi_1);\ \frac{u_{2,\rho}}{u_{2,z}} \approx -\mu_{2,\rho z};$$
$$\frac{u_{2,z}}{u_{2,\varphi}} \approx \mu_{2,\varphi z}\sin(4\varphi - \Delta\varphi_2);\ \frac{u_{3,\rho}}{u_{3,z}} \approx -\mu_{3,\rho z},\ \frac{u_{3,\varphi}}{u_{3,z}} \approx -\mu_{3,\varphi z}\sin(4\varphi - \Delta\varphi_2). \qquad (3)$$

Приближенность этих формул состоит в пренебрежении малыми осцилляциями для кривых на рис. 3, *а*, 3, *в*, 3, *д*, а также в замене осцилляций на рис

3, *г* и 3, *е* на синусоидальные. Последнее означает учет в Фурье-спектре этих функций только первой гармоники, осциллирующей с периодом 90°.

В указанном приближении уравнениям (3) удовлетворяет следующий набор амплитуд, оптимальный для последующего конструирования бесселевых пучков:

$$u_{1,z} = e^{im\varphi};\ u_{1,\rho} = \mu_{1,\rho z} e^{im\varphi};\ u_{1,\varphi} = \mu_{1,\varphi z} e^{im\varphi} \sin(4\varphi - \Delta\varphi_1);$$

$$u_{2,z} = \mu_{2,\varphi z} e^{im\varphi} \sin(4\varphi - \Delta\varphi_1);\ u_{2,\rho} = -\mu_{2,\rho z}\mu_{2,\varphi z} e^{im\varphi} \sin(4\varphi - \Delta\varphi_1);\ u_{2,\varphi} = e^{im\varphi}; \quad (4)$$

$$u_{3,z} = e^{im\varphi};\ \ u_{3,\rho} = -\mu_{3,\rho z}\ \ e^{im\varphi};\ u_{3,\varphi} = -\mu_{3,\varphi z} \sin(4\varphi - \Delta\varphi_2) e^{im\varphi}.$$

Явный вид амплитуд $a_{j,p}$ векторных БАП ($j = 1, 2, 3;\ p = \rho, \varphi, z$) находится далее расчетом табличных интегралов вида:

$$a_{j,p} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \mathrm{e}^{(iqr\cos(\varphi_1 - \varphi)} u_{j,p}(\varphi_1) d\varphi_1. \quad (5)$$

Таким образом, в работе представлен метод расчета векторных акустических бесселевых пучков для поперечно анизотропных кристаллов класса 4/m.

Библиографический список

1. Belyi V. N., Khilo P. A., Kazak N. S., Khilo N. A. Features of the acousto-optic interaction of Bessel light beams and Bessel acoustic beams in transversely isotropic crystals // J. Opt. Technol. 2015. Vol. 84, № 2. P. 130–136.

2. Hanorvar F., Sinclair A. N. Acoustic wave scattering from transversely isotropic cylinders // J. Acoust. Soc. Amer. 1996. Vol. 100, № 1. P. 57–63.

УДК 535.8

А. А. Быков*
кандидат технических наук
Д. Д. Хохлов*
кандидат технических наук
А. Ю. Марченков*
кандидат технических наук
Я. А. Элиович*
кандидат физико-математических наук
В. И. Аккуратов*
младший научный сотрудник
Ю. В. Писаревский*
доктор физико-математических наук
*Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»
**Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
***ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В TeO_2 ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Контроль качества кристаллических материалов востребован в процессе их роста, обработки и эксплуатации. При воздействии внешних факторов в структуре кристаллов могут развиваться дефекты, проявляющиеся при различных прилагаемых к ним нагрузках. В процессе выращивания кристалла не исключено образование дефектов, которые возможно обнаружить только с применением методов высокого разрешения. Рассмотрена возможность применения поляризационного метода, при помощи которого возможно обнаружение изменений в структуре кристалла при приложении внешней нагрузки.
Ключевые слова: кристаллические материалы, TeO_2, визуализация в поляризованном свете, неразрушающий контроль.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по гранту № 075-15-2021-1362 в части разработки методик проведения экспериментов, а также в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части подготовки образцов.

A. A. Bykov*
PhD, Tech.
D. D. Khokhlov*
PhD, Tech.
A. Yu. Marchenkov*
PhD, Tech.
Ya. A. Eliovich*
PhD, Phys.-Math.
V. I. Akkuratov*
Junior Research Employee

Yu. V. Pisarevsky*
Dr. Sc., Phys.-Math.
*National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
**Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation Russian Academy of Sciences
***Branch of Federal Scientific Research Center «Crystallography and Photonics» of Russian Academy of Sciences

APPLICATION OF POLARIZATION METHOD FOR DETECTION OF TeO_2 CHANGES UNDER PRESSURE

Quality control of crystalline materials is in demand during their growth, processing and operation. Various external factors may lead to growth of crystal structure defects appearing under mechanical loads. Defects formed through the crystal growth may be detected only using high resolution methods. The paper considers the feasibility of Mueller-matrix imaging for detection of structural changes in a crystalline specimen under an external mechanical load.
Keywords: crystalline materials, TeO_2, Mueller-matrix imaging, non-destructive testing.

Введение

Кристаллические материалы широко применяются в оптическом приборостроении. Примерами устройств на основе кристаллических материалов могут служить акустооптические устройства: перестраиваемые фильтры, используемые для выделения узкой спектральной полосы из широкополосного излучения, дефлекторы для отклонения лазерного луча в пространстве, модуляторы и синхронизаторы мод в лазерной технике [1; 2]. Область применения приборов, в состав которых входят устройства на основе кристаллических материалов, постоянно расширяется. В числе прочего такие устройства используются в составе бортовых приборов аэрокосмических аппаратов [3]. Характеристики упомянутых приборов должны сохраняться неизменными на протяжении всего срока службы аппарата в сложных условиях эксплуатации, поэтому важно оценивать и прогнозировать срок службы отдельных его элементов на этапе проектирования. Сжатие, ударные нагрузки, вибрации, колебания температуры и акустическое воздействие на кристалл могут вызвать некорректную работу устройства. Поэтому необходимо производить моделирование перечисленных внешних воздействий в лабораторных условиях в целях определения предельных нагрузок и механизма возникновения дефектов кристалла, оказывающих влияние на характеристики устройств.

Дефекты в кристалле могут иметь различную природу происхождения [4; 5]. Трещины, свили, включения и примеси в большинстве случаев можно выявить после изготовления кристалла путем его визуального осмотра или посредством световой микроскопии, такие дефекты можно отнести к легко обнаруживаемым. Внутренние напряжения, возникающие в процессе роста кристалла трудно обнаружить без помощи дополнительных средств и методов неразрушающего контроля. Для локализации внутренних напряжений может быть применен метод поляризационной микроскопии, который основывается на анализе параметров поляризованного оптического излучения, проходящего через

исследуемый образец. Анализ данных, получаемых с использованием метода поляризационной микроскопии, позволяет определить вероятные зоны возникновения и развития дефектов.

Данная работа посвящена развитию и экспериментальной апробации метода поляризационной визуализации для неразрушающего контроля кристаллических сред, который позволяет визуализировать пространственное распределение механических напряжений в кристаллических образцах, а также дифференцировать возникающие в процессе нагружения деформации. Данная возможность реализуется посредством регистрации и последующего анализа состояния поляризации излучения, взаимодействующего с отдельными пространственными элементами образца.

Описание установки и экспериментального метода

В рамках предложенного метода исследуемый образец освещается линейно поляризованным светом с заданной ориентацией плоскости поляризации, а прошедшее через образец излучение регистрируется камерой, оснащенной матричным приемником излучения, на светочувствительные элементы которого нанесен массив поляризационных фильтров четырех типов. Плоскость поляризации каждого из четырех типов поляризационных фильтров ориентирована под углом 0, 45, 90 и 135° к направлению строк матрицы светочувствительных элементов приемника соответственно. Состояние поляризации излучения, проходящего через образец, характеризуется параметрами S_0, S_1, S_2, S_3, которые входят в вектор Стокса $\vec{S}$:

$$\vec{S} = (S_0, S_1, S_2, S_3)^T. \quad (1)$$

Значения параметров связаны с непосредственно измеряемыми значениями интенсивности излучения для четырех ориентаций плоскости поляризации следующим образом:

$$\begin{aligned} S_0 &= I_0 + I_{90}, \\ S_1 &= I_0 - I_{90}, \\ S_2 &= I_{45} - I_{135}, \end{aligned} \quad (2)$$

где I_0, I_{45}, I_{90}, I_{135} – интенсивность оптического излучения, ориентация плоскости поляризации которого совпадает с соответствующими направлениями, а параметр S_3 исключается из рассмотрения на основании допущения о том, что излучение подсветки является линейно поляризованным.

Под действием внешних механических нагрузок в структурно неоднородном материале локализуются зоны повышенного механического напряжения. При этом фотоупругость материала образца проявляется в возникновении зон с наведенной оптической анизотропией. Изменение состояния поляризации излучения, проходящего через такие зоны, позволяет обнаружить их при помощи методов поляризационной микроскопии. Количественную оценку изменения состояния поляризации в рамках предложенного метода следует производить

на основании степени линейной поляризации излучения (Degree of Linear Polarization, DoLP) и угла линейной поляризации (Angle of Linear Polarization, AoLP). Степень линейной поляризации является относительной величиной, отражающей способность материала образца сохранять состояние взаимодействующего с ним линейно поляризованного излучения, и определяется как

$$\mathrm{DoLP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}. \qquad (3)$$

Значение угла линейной поляризации отображает ориентацию плоскости поляризации линейно поляризованного излучения после взаимодействия с материалом образца относительно строк матрицы светочувствительных элементов приемника и определяется в соответствии с соотношением (4). Значение AoLP лежит в пределах от –π/2 до π/2:

$$\mathrm{AoLP} = \mathrm{arctg}\frac{S_2}{S_1}. \qquad (4)$$

В процессе испытания образец закреплялся между обкладками пресса и подвергался одноосному механическому сжатию. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

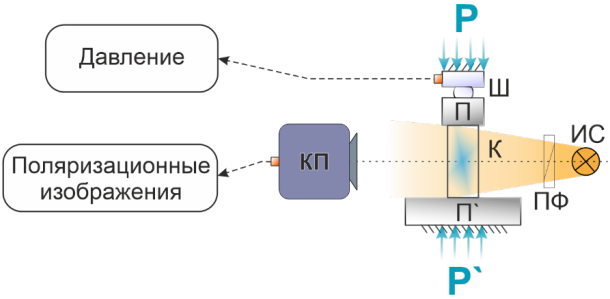


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: КП – камера поляризационная, П – обкладки пресса, Ш – плавающий шарнир, ПФ – поляризационный фильтр, ИС – источник света, Р – давление пресса, К – кристалл

Для сжатия используется электромеханическая испытательная машина (пресс) Instron 5982. На протяжении процесса сжатия и последующего снятия внешней нагрузки при помощи поляризационной камеры КП (The Imaging Source DZK 33UX250) с объективом, обладающим фокусным расстоянием 105 мм, производится регистрация поляризационных изображений $I_0(x,y)$, $I_{45}(x,y)$, $I_{90}(x,y)$, $I_{135}(x,y)$. Подсветка образца производится при помощи источника света ИС, на выходе которого установлен поляризационный фильтр ПФ. КП устанавливается таким образом, чтобы она находилась на одной оси с ИС и кристаллом К, зажатым между обкладками пресса П, П`. Фокальная плоскость

объектива камеры КП совмещается с ближайшей к ней поверхностью образца. Для равномерности распределения нагрузки по поверхности исследуемого образца на верхнюю обкладку пресса П усилие передается через плавающий шарнир Ш.

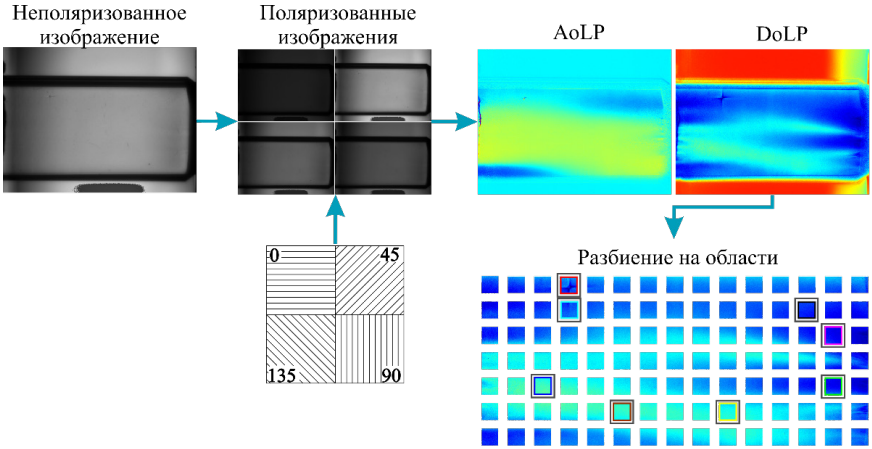


Рис. 2. Последовательность получения пространственных распределений AoLP и DoLP в исследуемом образце и разбиение на зоны исследования. Цветами обозначены квадратные области, представленные на рис. 3 в виде кривых, зависящих от времени

На рис. 2 проиллюстрирована последовательность получения пространственных распределений AoLP и DoLP в исследуемом образце. Высокая скорость протекания структурных изменений в кристалле обусловливает необходимость обеспечения регистрации поляризационных изображений с временным разрешением. Частота регистрации кадров ограничивается пропускной способностью интерфейса КП и уровнем интенсивности изображения, определяющим требуемое время накопления единичного кадра. В представленном эксперименте скорость регистрации данных составляла 80 кадров в секунду.

Экспериментальные данные

В ходе эксперимента был исследован образец размерами 20,0×10,0×10,0 мм^3, изготовленный из кристалла парателлурита TeO_2 – кристаллического материала, широко используемого в составе акустооптических устройств [6–11]. Механическое нагружение образца производилось вдоль кристаллографической оси [001]. В процессе испытания прикладываемая механическая нагрузка монотонно возрастала вплоть до достижения значения в 10 МПа. После достижения данного знаначения, кристалл плавно разгружался до начального значения 0 МПа. На рис. 2 показано пространственное распределение DoLP в кристалле при максимальном значении нагрузки и его

разбиение на 105 областей усреднения с размером 40×40 пикселей, для которых были построены временные зависимости AoLP и DoLP, показанные на рис. 3.

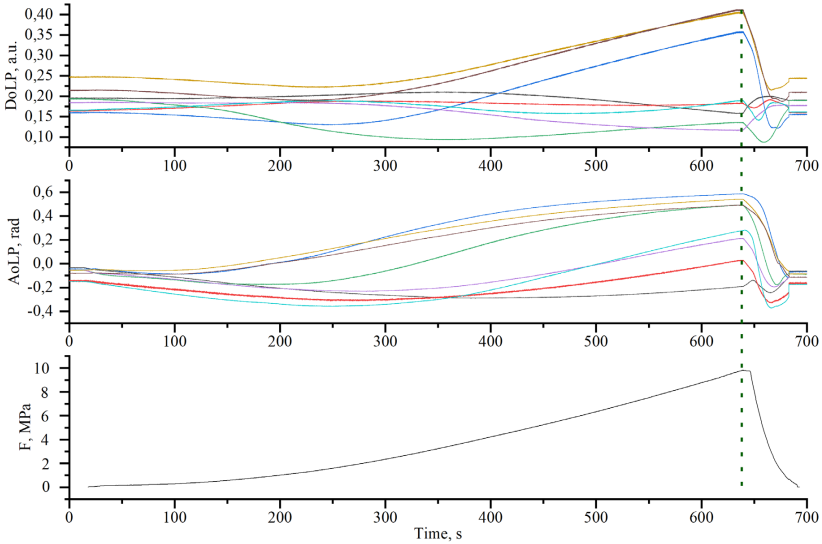


Рис. 3. Угол и степень поляризации образца в зависимости от времени. Цвет кривых совпадает с цветом области, обозначенной на рис. 2

Неоднородность пространственного распределения DoLP, существенное изменение AoLP и DoLP с ростом нагрузки, а также наличие локального экстремума в момент достижения максимальной нагрузки, характерного для всех выбранных областей усреднения, говорит о способности предложенного метода обнаружить зоны локализации повышенных механических напряжений. На рис. 3 можно отчетливо увидеть момент остановки нагружения кристалла (обозначен пунктирной линией) на 632-й секунде эксперимента. После начала разгружения кристалла показатели AoLP и DoLP резко меняются и принимают исходные значения.

Заключение

Описана схема эксперимента для получения поляризационных изображений кристалла TeO_2. Показано, что механическое сжатие приводит к существенному изменению угла и степени поляризации, что может быть индикатором для диагностики внутренних изменений структуры исследуемого кристалла вплоть до возникновения необратимых дефектов. Для более детального изучения возникающих в кристалле напряжений и предсказания дефектных областей внутри кристалла, в которых могут возникнуть необратимые дефекты, влияющие на эксплуатационные свойства кристалла, требуется получение статистических данных из экспериментов с разрушением образца.

Библиографический список

1. Dmitriev V., Gurzadyan G., Nikogosyan D. Handbook of nonlinear optical crystals. Springer, 1999. 432 p.

2. Bain A. K. Crystal optics: properties and applications. Wiley, 2019. 496 p.

3. Acousto-optic tunable filter spectrometers in space missions [Invited] / O. I. Korablev, D. A. Belyaev, Y. S. Dobrolenskiy [et al.] // Appl. Opt. 2018. Vol. 57. P. 103–119.

4. Kolesnikov A. I., Kaplunov I. A., Terent'ev I. A. Defects of different sizes in large paratellurite single crystals // Crystallogr. 2004. Rep. 49. P. 180–183.

5. Kaplunov I. A., Shelopaev A. V., Kolesnikov A. I. Structural defects in germanium single crystals // J. Surf. Investig. 2010. Vol. 4. P. 994–997.

6. Arlt G., Schweppe H. Paratellurite, a new piezoelectric maternal // Solid State Communications. 1968. Vol. 6 (11). P. 783–784.

7. Uchida N. Optical properties of single-crystal paratellurite // Physical Review B. 1971. Vol. 4 (10). P. 3736.

8. Ogi H., Fukunaga M., Hirao M., Ledbetter H. Elastic constants, internal friction, and piezoelectric coefficient of $\alpha-TeO_2$ // Physical Review B. 2004. Vol. 64 (2). P. 024104.

9. Warner A. W., White D. L., Bonner W. A. Acousto-optic light deflectors using optical activity in paratellurite // Journal of Applied Physics. 1972. Vol. 43 (11). P. 4489–4495.

10. Antonov S. N. Acoustooptic nonpolar light controlling devices and polarization modulators based on paratellurite crystals // Technical physics. 2004. Vol. 49. P. 1329–1334.

11. Molchanov V. Y., Voloshinov V. B., Makarov O. Y. Quasi-collinear tunable acousto-optic paratellurite crystal filters for wavelength division multiplexing and optical channel selection // Quantum Electronics. 2009. Vol. 39 (4). P. 353.

УДК 621.372.63

С. А. Доберштейн*
ведущий научный сотрудник
И. В. Веремеев*
старший научный сотрудник
В. К. Разгоняев*
старший научный сотрудник
*Омский научно-исследовательский институт приборостроения
**Омский научный центр Сибирского отделения РАН
(Институт радиофизики и физической электроники)

АСИНХРОННЫЕ ВЫСОКОДОБРОТНЫЕ STW-РЕЗОНАТОРЫ С СЕКЦИОНИРОВАННЫМИ ОТРАЖАТЕЛЬНЫМИ РЕШЕТКАМИ И ПОСТЕПЕННЫМ УВЕЛИЧЕНИЕМ ПЕРИОДА ЭЛЕКТРОДОВ

Представлены данные по влиянию секционирования отражательных решеток с апериодичностью электродов на добротность асинхронных STW-резонаторов. Показано, что использование секционированных отражательных решеток с постепенным увеличением периода электродов приводит к увеличению добротности до 11500 у асинхронных STW-резонаторов в диапазоне частот 700–800 МГц на срезе УХ/36°+90° кварца.
Ключевые слова: поверхностные поперечные волны, резонатор, добротность, секционирование.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер государственной регистрации проекта 121121700062-3).

S. A. Doberstein*
Leading Research Employee
I. V. Veremeev*
Senior Research Employee
V. K. Razgonyaev*
Senior Research Employee
*Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering
**Omsk Scientific Center Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
(Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

ASYNCHRONOUS HIGH QUALITY FACTOR STW-RESONATORS WITH SECTIONED REFLECTORS AND GRADUALLY INCREASING PERIOD OF THE ELECTRODES

This paper presents the data for the influence a sectionalization of the reflectors with electrodes aperiodicity on the quality factor of the asynchronous STW resonators. It was shown that use of the sectional reflectors with gradually increasing periodicity results to increasing the quality factor up to 11500 for asynchronous STW resonators in a frequency range of 700–800 MHz on 36°УХ90° cut quartz.
Keywords: surface transverse waves, resonator, quality factor, sectionalization.

Поверхностные поперечные волны (Surface Transverse Waves – STW) на кварце имеют высокую скорость распространения акустической волны 5000 м/с, на 60% превышающую скорость рэлеевской поверхностной акустической волны (ПАВ), что обеспечивает ширину электрода и зазора встречно-штыревого преобразователя (ВШП) 1,56–1,78 мкм в диапазоне частот 700–800 МГц. Это облегчает фотолитографию и позволяет успешно использовать STW для создания высокочастотных резонаторов [1; 2]. В работе исследованы асинхронные STW-резонаторы с высокой добротностью на срезе УХ/36°+90° кварца. Резонаторы выполнялись по одновходовой схеме, когда ВШП располагался между двумя отражательными решетками (ОР) с закороченными электродами (рис. 1). Добротность таких резонаторов определяется отражательной способностью ОР при всех равных условиях: минимуме потерь на распространение и на проводимость алюминиевых электродов в ВШП при заданной толщине и коэффициенте металлизации электродов. Отражательная способность ОР зависит от количества электродов ОР, толщины металлизации и коэффициента металлизации электродов, а также от совпадения по частоте центра полосы задерживания и максимума коэффициента отражения ОР на кварце с максимумом проводимости ВШП. Совпадение по частоте центра полосы задерживания и максимума коэффициента отражения ОР с максимумом проводимости ВШП определяется соотношением между периодами электродов ОР и ВШП. В этом случае STW-резонатор становится асинхронным [2].

Конструктивно-топологическая оптимизация резонаторов проводилась с помощью компьютерного моделирования с использованием модели эквивалентных схем [3]. Эквивалентная схема STW-резонатора подобна эквивалентной схеме обычного ПАВ-резонатора и показана на рис. 1. Здесь P-матрица смешанных параметров ВШП: Z_0 – характеристический импеданс среды между ВШП и ОР, V_0 – скорость STW; $R = Z_0(1 + \Gamma)/(1 - \Gamma)$ – эквивалентный импеданс ОР; Г – коэффициент отражения ОР. Оптимизация параметров топологии резонатора (рис. 1) позволяет получить высокую добротность Q STW-резонаторов в диапазоне частот 700–1000 МГц.

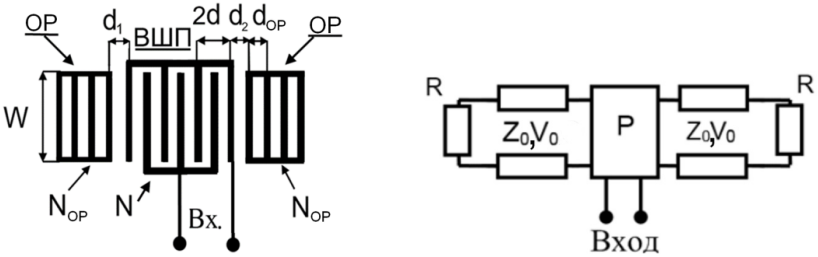


Рис. 1. Топология одновходового STW-резонатора и его эквивалентная схема

Параметры топологии резонаторов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры топологии STW-резонаторов

Параметр	765 МГц
Число электродов в ОР, N_{OP}	285
Число пар электродов в ВШП, N	100
Соотношение между периодами электродов в ВШП и ОР, d/d_{OP}	0,997
Расстояние между ВШП и ОР, $d_1 = d_2$	d_{OP}
Апертура, W	80λ
Толщина электродов, h/λ*	2,5%
Коэффициент металлизации, $K_м$	0,5

*λ – длина STW на f_0.

Представленные на рис. 2 расчетные и измеренные частотные характеристики действительной и мнимой части проводимости соответственно асинхронного STW-резонатора на кварце YX/36°+90° на частоту 765 МГц демонстрируют хорошее совпадение.

G, мСм

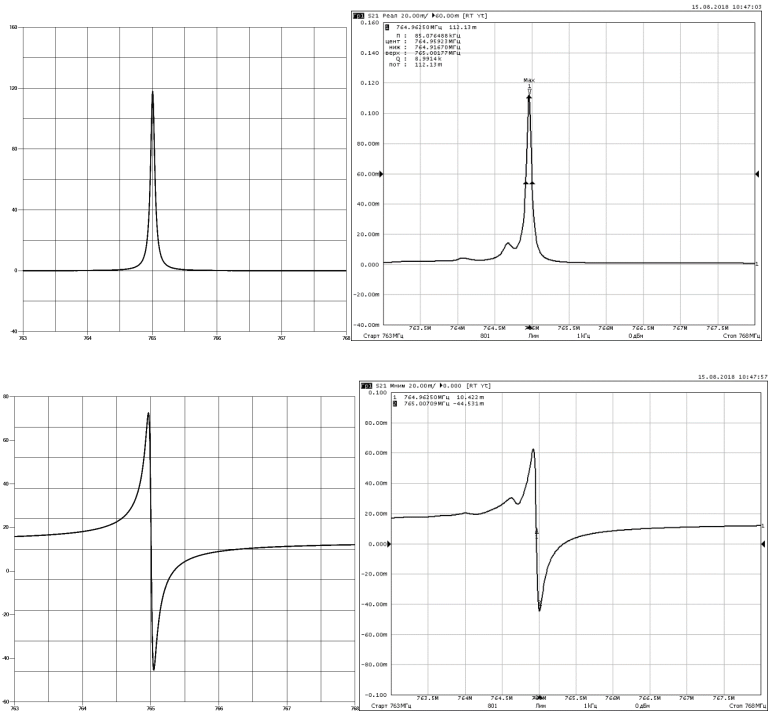


Рис. 2. Расчетные и измеренные частотные характеристики проводимости STW-резонатора на частоту 765 МГц

Оптимизированные асинхронные STW-резонаторы в диапазоне частот 700–800 МГц обеспечили типовую добротность 9000, уменьшенную длину ВШП, ОР и апертуру [4] по сравнению с известными прототипами [1; 2] и помещались в SMD-корпуса размерами 5×5×1,8 мм.

Расчеты и эксперименты показали, что уменьшение добротности STW-резонаторов в диапазоне частот >700 МГц связано с падением отражательной способности ОР. Принцип работы резонатора на STW основан на эффекте локализации акустической энергии стоячей волны в резонансной полости, ограниченной двумя ОР (рис. 3). Стоячая волна образуется в резонаторе за счет возбуждения ВШП акустической волны и многократного ее отражения от ОР слева и справа. Очень важно, чтобы эти волны были одинаковы по амплитуде и фазе. Только тогда обеспечивается максимум акустической энергии в резонаторе или максимум добротности. Добротность резонатора, связанная с локализованной в нем акустической энергией, определяется при всех равных условиях отражательной способностью ОР.

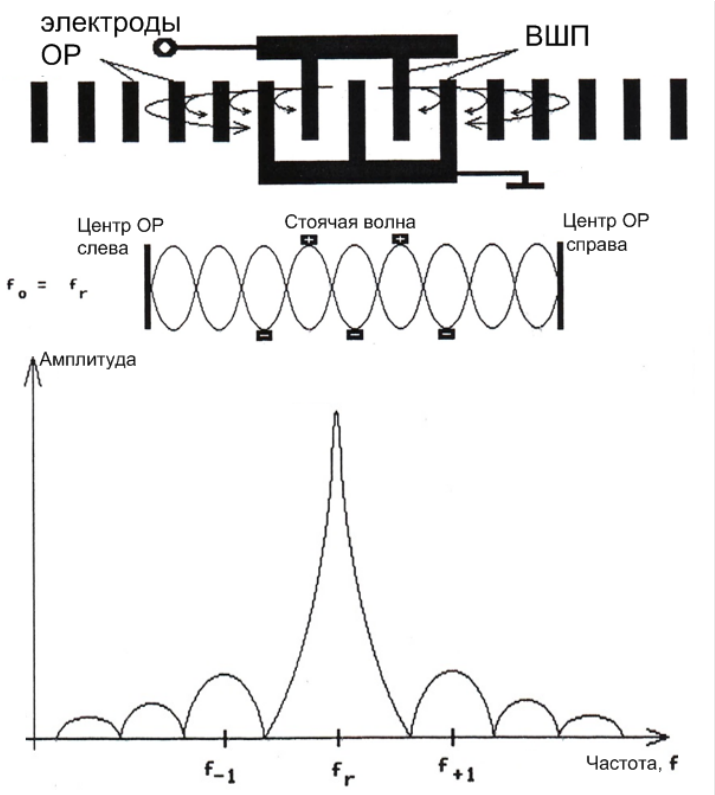


Рис. 3. Принцип работы одноходового STW-резонатора

Для увеличения отражательной способности ОР можно увеличить относительную толщину и коэффициент металлизации электродов соответственно до 2,5% и 0,55. Однако при ширине электродов и зазоров 1,56–1,78 мкм эти величины технологически реализовать с заданной точностью проблематично, в результате чего асинхронные резонаторы с высокой добротностью 10600 (табл. 2) имеют недостаточно высокий процент выхода годных в диапазоне частот 700–800 МГц.

Таблица 2

Экспериментальные данные STW резонатора на f_0 = 765 МГц

$K_м$	0,5	0,55	0,5*
f_0, МГц	764,96	765,96	766
Q	9000	10600	12000

**Секционированная ОР.*

Кроме того, для обеспечения асинхронности топологии STW-резонаторов требуется скачкообразное изменение периода электродов ОР. Это приводит к рассеиванию энергии STW в объемные волны [2] и, как следствие, ограничивает добротность резонаторов. В этой связи проведены исследования секционирования ОР с постепенным увеличением периода электродов, но с коэффициентом металлизации K_m = 0,5 (рис. 4) [2]. Такое конструктивное решение позволит уменьшить рассеивание энергии STW в объемные волны, стабильно изготавливать асинхронную топологию с заданной точностью.

По результатам исследований показано, что использование секционированных ОР с постепенным увеличением периода электродов привело к увеличению добротности асинхронных STW-резонаторов в диапазоне частот 700–800 МГц до значения 11500 (рис. 5). STW-резонаторы с увеличенной добротностью позволят расширить сферу их применения для аппаратуры частотной фильтрации и частотной стабилизацию.

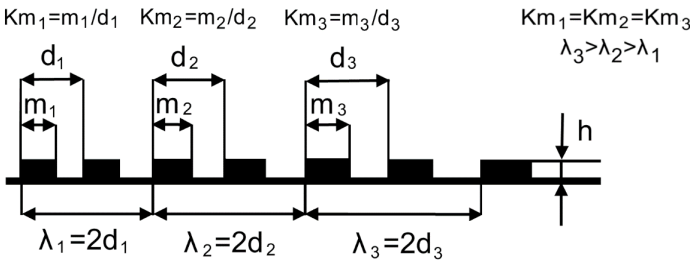
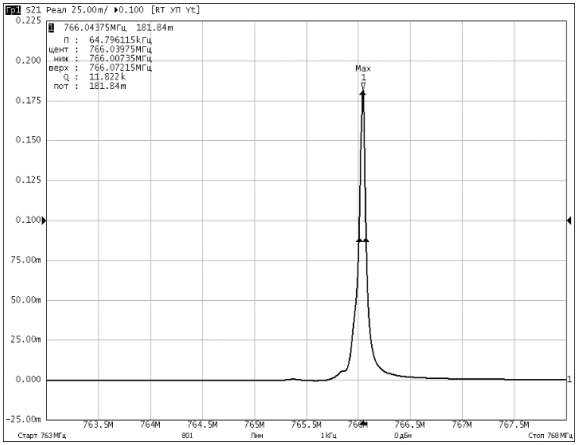


Рис. 4. Топология ОР с секционированием и постепенным увеличением периода электродов

G, мСм



B, мСм

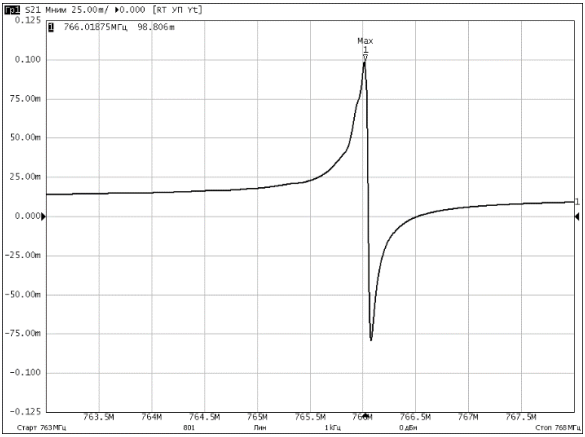


Рис. 5. Измеренные частотные характеристики проводимости STW-резонатора на частоту 766 МГц с секционированной ОР

Библиографический список

1. Design of Asynchronous STW Resonators for Filters and High Stability Source Applications / J.-M. Fredit, S. Alzuaga, N. Raiter [et al.] // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 2005. P. 1315–1318.

2. Kim C. U., Plessky V. P., Wang W., Grigorievski V. I. High Q-factor STW-Resonators on AT-cut of Quartz // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 2007. P. 2582–2585.

3. Веремеев И. В., Доберштейн С. А., Разгоняев В. К. Моделирование ПАВ-резонаторов и лестничных ПАВ-фильтров методом Р-матриц // Техника радиосвязи. 2018. Вып. 3. С. 61–71.

4. Патент РФ на полезную модель № 212600, H03H 9/25, H03H 9/19. Асинхронный резонатор на поперечных поверхностных акустических волнах / Доберштейн С. А., Веремеев И. В. Заявл. 09.03.2022, опубл. 01.08.2022. Б. И. № 22.

УДК 534.522.1

Е. И. Костылева*
аспирант
С. Н. Манцевич*
доктор физико-математических наук, профессор
*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

КВАЗИКОЛЛИНЕАРНАЯ ГЕОМЕТРИЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КРИСТАЛЛАХ ГАЛОГЕНИДОВ РТУТИ

Проведено теоретическое исследование параметров квазиколлинеарного акустооптического (АО) взаимодействия, использующего отражение акустической волны от грани АО-ячейки, в кристаллах галогенидов ртути: хлорида, бромида и йодида ртути. Найдены зависимости скорости распространения ультразвука, угла сноса, разрешения, частоты АО-синхронизма и величины сжатия оптических импульсов от ориентации волнового вектора отраженной акустической волны. Проведено сопоставление полученных результатов с соответствующими зависимостями для кристалла парателлурита.
Ключевые слова: акустооптика, квазиколлинеарная дифракция, галогениды ртути.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-12-00072-П. Костылева Е. И. является стипендиатом фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

E. I. Kostyleva*
PhD Student
S. N. Mantsevich*
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor
*M. V. Lomonosov Moscow State University

QUASICOLLINEAR GEOMETRY OF ACOUSTO-OPTICAL INTERACTION IN MERCURY HALIDE CRYSTALS

The theoretical investigation of quasicollinear acousto-optic (AO) interaction properties in mercury halide crystals: chloride, bromide and mercury iodide was fulfilled. The examined geometry applied acoustic wave reflection from the input optical face of the AO cell. The dependencies of the ultrasound propagation velocity, walk-off angle, resolution, AO phase matching frequency, possible optical pulse compression magnitude on the reflected acoustic wave phase velocity vector were obtainede. A comparison with the corresponding dependencies for the crystal of paratellurite was also carried out.
Keywords: acousto-optics, quasicollinear diffraction, mercury halide.

Введение

Одно из основных направлений исследований современной АО – расширение диапазона эффективного функционирования АО-устройств на ИК-область оптического спектра. Одним из перспективных методов решения данной задачи на сегодняшний день считается использование семейства кристаллов галогенидов ртути. Кроме того, благодаря большому двулучепреломлению данные кристаллы могут быть полезны для создания АО-дисперсионных линий

задержки (АОДЛЗ), работающих с излучением как ближнего, так и среднего ИК-диапазона. Известные свойства галогенидов ртути таковы, что их применение потенциально позволяет получить большие значения спектрального разрешения квазиколлинеарных АО-ячеек, а также более эффективно реализовать управление длительностью оптических импульсов, чем при использовании кристалла диоксида теллура.

Рассмотрено семейство тетрагональных кристаллов галогенидов ртути, включающее хлорид, бромид и йодид ртути. Данные кристаллы прозрачны в диапазоне длин волн оптического излучения от 0,38–0,53 до 20–30 мкм и при этом обладают большим двулучепреломлением. Примечательны и их акустические свойства. Известно, что скорость медленной моды вдоль оси [110] в два и более раз ниже, чем для парателлурита. Расчеты показывают, что и при ориентации вектора фазовой скорости ультразвука под углами до 10 градусов относительно оси [110] скорость распространения медленной акустической моды существенно ниже, чем в кристалле диоксида теллура. Некоторые физические характеристики рассматриваемых кристаллов приведены в таблице.

Значения используемых в вычислениях констант для парателлурита [1–2] и галогенидов ртути [3]

Кристалл	TeO_2	Hg_2Cl_2	Hg_2Br_2	Hg_2I_2
ρ, кг/м^3	6000	7190	7310	7700
$c_{11}\cdot 10^{10}$, Н/м^2	5.612	1.892	1.616	1.426
$c_{12}\cdot 10^{10}$, Н/м^2	5.155	1.712	1.5	1.327
$c_{44}\cdot 10^{10}$, Н/м^2	2.668	0.8456	0.7446	0.584
n_o (для 1,053 мкм)	2.2017	1.8212	1.9454	2.1115
n_e (для 1,053 мкм)	2.3439	2.3938	2.6972	3.3358

Результаты и их анализ

Будем рассматривать квазиколлинеарную геометрию АО-взаимодействия в плоскости (1–10) выбранных кристаллов, реализуемую при отражении акустической волны от входной грани АО-ячейки без смены типа акустической моды. Таким образом, вектор групповой скорости отраженной волны и волновой вектор падающего светового излучения будут коллинеарны, что позволяет получить наибольшую возможную длину АО-взаимодействия и, следовательно, спектральное разрешение.

В данной плоскости скорость медленной акустической моды и угол сноса акустической волны определяются выражениями:

$$V_s(\theta)=\sqrt{\frac{\frac{c_{11}-c_{12}}{2}\sin^2\theta+c_{44}\cos^2\theta}{\rho}}, \qquad (1)$$

$$\chi(\theta) = arctg\left(\frac{(2\cdot c_{44} - c_{11} + c_{12})\cdot ctg(\theta)}{c_{11} - c_{12} + 2\cdot c_{44}\cdot ctg^2(\theta)}\right). \quad (2)$$

Здесь V_s – скорость сдвиговой акустической волны; c_{11}, c_{12}, c_{44} – модули упругости; θ – угол между направлением распространения акустической волны и осью Z; χ – угол сноса акустической волны.

Чтобы определить направление распространения ультразвуковой волны после отражения, необходимо чтобы было выполнено условие: проекции на отражающую плоскость векторов обратных скоростей, падающей S_1 и отраженной S_2 акустических волн должны быть равны:

$$S_1(\alpha_1)\cdot\sin\chi_1 = S_2(\alpha_2)\cdot\sin(\alpha_2 + \alpha_1 + \chi_1), \quad (3)$$

где α_1 и α_2 – углы, которые задают направления ориентации векторов фазовой скорости, отраженной от оптической грани и падающей акустических волн относительно оси [110] соответственно; χ_1 – угол сноса отраженной акустической волны.

Для рассмотренной плоскости (1–10) были найдены два аналитических решения соотношения (3). Одно тривиальное, а второе позволило выразить в явном виде зависимость угла α_2, от величины α_1. Полученные для параателлурита и кристаллов галогенидов ртути результаты представлены рис. 1 в виде графиков зависимости $\Theta(\alpha_1)$, где Θ – угол между входной оптической гранью и гранью, на которой расположен пьезопреобразователь.

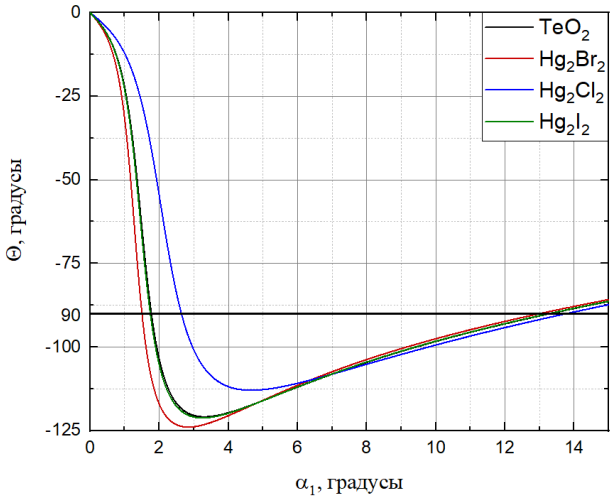


Рис. 1. Зависимость угла между гранью, на которой расположен пьезопреобразователь АО-ячейки, и входной оптической гранью от ориентации вектора фазовой скорости отраженной акустической волны

Построенная для TeO_2 кривая соответствует описанной ранее зависимости [4] и практически совпадает с результатами расчета для Hg_2I_2. В случае Hg_2Br_2 значения углов Θ оказываются несколько большими, чем для TeO_2, а для Hg_2Cl_2 – меньшими. Геометрия, в которой грань преобразователя ортогональна входной оптической грани, наблюдается при следующих значениях α_1: 1,78 и 13,31°; 2,64 и 13,78°; 1,50 и 13,01°; 1,77 и 13,28° для парателлурита, каломели, бромида и йодида ртути соответственно.

К сожалению, для указанных материалов неизвестно значение фотоупругой константы p_{44}, что делает невозможным расчет точной величины АО-качества *M*, но можно предполагать, что ее значение положительно и мало, тогда *M* каломели оказывается чуть больше АО-качества парателлурита, а *M* бромида и, особенно, йодида ртути – существенно больше [5]. При применении этих материалов в квазиколлинеарных АОДЛЗ большее значение *M* является преимуществом, так как позволяет заметно снизить управляющую мощность при реализации многочастотной дифракции.

Для галогенидов ртути известны оптические и акустические свойства, что делает возможным проведение расчетов частот АО-синхронизма, спектрального разрешения и изменения длительности оптических импульсов. Представленные далее значения величин этих характеристик получены для углов α_1 от 0 до 10° и длины волны оптического излучения 1,053 мкм. Выбор длины волны света обусловлен удобством сопоставления полученных результатов с характеристиками квазиколлинеарных АО-ячеек на основе парателлурита

Для соединений ртути частоты АО-синхронизма будут иметь существенно большие величины. При малых значениях α_1 для TeO_2 частоты синхронизма составляют около 75 МГц, для хлорида и бромида ртути – около 200, а для йодида ртути – более 300 МГц. При этом частота синхронизма с ростом угла среза для Hg_2I_2 быстро убывает и при $\alpha_1 = 10°$ становится почти равной наблюдаемой для TeO_2. Для кристаллов бромида и хлорида ртути изменение происходит не столь сильным образом.

Поскольку спектральное разрешение определяется частотой ультразвука, величина спектрального разрешения убывает с ростом угла среза. Наибольшее разрешение достигается для Hg_2I_2 при малых углах среза, его величина более чем в 3,5 раза превышает разрешение, достигаемое в TeO_2. Применение кристаллов хлорида и бромида ртути позволяет достичь спектрального разрешения как минимум в два раза больше наблюдаемого в парателлурите при той же длине АО-взаимодействия. Это дает возможность уменьшить длину АО ячейки в 2–3 раза без потери величины спектрального разрешения относительно парателлурита. С учетом меньшей акустической анизотропии галогенидов ртути уменьшение длины АО-ячейки существенно снижает неоднородность акустического пучка и температуры.

Важной характеристикой АО-дисперсионных линий задержки является величина сжатия (растяжения) оптического импульса, которую можно в них реализовать, поскольку данная величина определяет способность АО-устройства

корректировать искажения, вносимые системой усиления оптических импульсов.

Расчеты величины изменения длительности оптического импульса, проведенные для длины АО-взаимодействия 1 см, показали, что при малых значениях угла среза значение величины сжатия для TeO_2 составляет около 5 пс, для хлорида и бромида ртути около 20, а для йодида ртути около 40 пс. С ростом α_1 величина сжатия для Hg_2I_2 быстро убывает и при 10° оказывается близка к наблюдаемой для кристалла парателлурита.

Выводы

Исследована возможность применения кристаллов галогенидов ртути для создания квазиколлинеарных АО-ячеек, используемых как АОДЛЗ. Определены геометрии отражения ультразвука, позволяющие получить рабочий акустический пучок, коллинеарный световому. Определены основные характеристики АОДЛЗ и проведено их сопоставление со случаем использования кристалла парателлурита. Показано, что наибольшие преимущества дает применение кристалла йодида ртути.

Библиографический список

1. Molchanov V., Makarov O. Quasicollinear acoustooptic filters using strong acoustic anisotropy in tellurium dioxide crystal // J. Phys. Conf. Ser. 2007. Vol. 92, № 1. P. 1–4.

2. Georgiev G., Glenar D. A., Hillman J. J. Spectral characterization of acousto-optic filters used in imaging spectroscopy // Appl. Opt. 2002. Vol. 41, № 1. P. 209–217.

3. Bárta C., Barta C. Jr. Physical properties of single crystals of the calomel gorup (Hg2X2 : X=Cl, Br)1 // Mater. Sci. Forum. 1991. Vol. 61. P. 93–150.

4. Molchanov V. Y., Voloshinov V. B., Makarov O. Y. Quasi-collinear tunable acousto-optic paratellurite crystal filters for wavelength division multiplexing and optical channel selection // Quantum Electron. 2009. Vol. 39, № 4. P. 353–360.

5. Krauz L., Páta P., Bednář J., Klíma M. Quasi-collinear IR AOTF based on mercurous halide single crystals for spatio-spectral hyperspectral imaging // Opt. Express. 2021. Vol. 29. P. 12813–12832.

УДК 535.421

М. И. Купрейчик*
ведущий электроник
В. И. Балакший*
доктор технических наук, профессор
С. Н. Манцевич*
доктор технических наук, профессор
*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ДВУОСНОГО КРИСТАЛЛА ЙОДИДА ИНДИЯ

Проведен детальный анализ характеристик спектрально-поляризационной геометрии дифракции в двуосном кристалле йодида индия. Рассчитаны основные характеристики акустооптических фильтров, использующих подобные варианты взаимодействия в главных плоскостях. Выявлены оптимальные срезы материала как для фильтрации изображений, так и для решения задач спектрального анализа. Доказана перспективность кристалла йодида индия для перестраиваемых акустооптических фильтров инфракрасного диапазона.
Ключевые слова: акустооптика, двуосные кристаллы, перестраиваемые акустооптические фильтры, поляризационный анализ, спектральное разрешение.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РНФ № 19-12-00072.

M. I. Kupreychik*
Leading Electronic Engineer
V. I. Balakshy*
Dr. Sc., Tech., Professor
S. N. Mantsevich*
Dr. Sc., Tech., Professor
*M. V. Lomonosov Moscow State University

SPECTROPOLARIMETRIC IR ACOUSTO-OPTIC FILTERS BASED ON BIAXIAL INDIUM IODIDE CRYSTAL

A detailed analysis of the characteristics of the spectral-polarization diffraction geometry in a biaxial indium iodide crystal has been carried out. All the main parameters of the acousto-optic filters utilizing similar interaction regimes in the principal planes are calculated. The optimal crystal cuts both for hyperspectral imaging and high-resolution spectral analysis have been identified. The prospects of indium iodide crystal for tunable IR acousto-optic filters fabrication are proved.
Keywords: acousto-optics, biaxial crystals, tunable acousto-optic filters, polarization analysis, spectral resolution.

Введение

Неколлинеарные перестраиваемые акустооптические фильтры (АОПФ) находят широкое применение в гиперспектральных изображающих системах. Высокое быстродействие вместе с возможностью гибкого электронного управ-

ления параметрами инструментальной функции выгодно отличает их от аналогов, построенных на других физических принципах. Классические АОПФ функционируют на основе тангенциальной геометрии дифракции в оптически анизотропных кристаллах, обеспечивающей такому АО-фильтру широкое угловое поле зрения, достаточное для обработки изображений. Для корректной работы подобного АО-прибора оптическое излучение на его входе должно быть линейно поляризованным. При решении задач фильтрации неполяризованного или частично поляризованного излучения упомянутая особенность приводит к большим световым потерям. Для преодоления этого недостатка в работе [1] было предложено использовать спектрально-поляризационную (СП) геометрию анизотропной дифракции, при которой каждая из оптических мод кристалла испытывает рассеяние в свой дифракционный порядок. Спектрально-поляриметрические АОПФ, функционирующие на основе такой геометрии, позволяют проводить комбинированный спектрально-поляризационный анализ оптических изображений, что заметно расширяет область их возможного применения.

Основным материалом для АОПФ видимого и инфракрасного (ИК) диапазона является одноосный кристалл парателлурита (TeO_2). Высокая степень анизотропии физических свойств парателлурита позволяет создавать на его основе высокоэффективные АОПФ в диапазоне длин волн от 0,35 до 5 мкм. Проблема поиска подходящего материала для фильтрации расходящихся оптических пучков на длинах волн более 5 мкм – одна из наиболее актуальных задач современной акустооптики. Помимо очевидного требования высокой оптической прозрачности, такой материал должен сочетать высокое двулучепреломление с очень высокими значениями коэффициента АО-качества. Среди известных одноосных АО-кристаллов наиболее подходящими характеристиками обладают кристаллы семейства галогенидов ртути [2]. В списке перспективных материалов имеются и двуосные кристаллы. Например, кристалл йодида индия (InI), изучению перспективности которого для инфракрасных АО-фильтров и посвящена настоящая работа.

Йодид индия – синтетический двуосный монокристалл центрального класса (mmm) ромбической сингонии, выгодно отличающийся хорошими АО-свойствами [3]. Материал прозрачен в диапазоне длин волн от 0,63 до 51 мкм. Столь широкий диапазон прозрачности кристалла вместе с высоким двулучепреломлением делает йодид индия одним из наиболее перспективных материалов для инфракрасных АО-фильтров различного типа. Дальнейшие расчеты характеристик спектрально-поляриметрической дифракции в кристалле InI проводились для излучения с $\lambda = 10{,}6$ мкм. В таком случае главные показатели преломления материала равны: $n_X = 2{,}42$; $n_Y = 2{,}89$; $n_Z = 2{,}55$ [3]. Оптические оси кристалла лежат в плоскости XY; угол между ними составляет 70,4°. Как показали наши расчеты, для создания спектрально-поляриметрических АО-фильтров наиболее подходят главные плоскости YZ и XZ. При исследовании характеристик дифракции в этих плоскостях удобно определить угол среза кристалла χ, задающий направление распространения сдвиговой акустической мо-

ды с сагиттальной поляризацией, отсчитывая его от осей [001] и [100] в плоскостях *YZ* и *XZ*.

Йодид индия относится к числу новых АО-материалов, поэтому его акустические и АО-свойства почти совсем не изучены. Известны лишь значения фазовых скоростей продольных акустических мод вдоль кристаллографических осей и значения коэффициентов АО-качества для вариантов изотропного рассеяния света с $\lambda = 0{,}65$ мкм на подобных акустических модах. Этих данных недостаточно ни для расчета параметров сдвиговых мод, ни для оценки энергетических характеристик анизотропной дифракции в плоскостях *YZ* и *XZ*. Поэтому проводимый далее анализ характеристик СП-геометрии в кристалле йодида индия затрагивает лишь оптическую часть АО задачи.

Результаты расчетов

Частотные зависимости углов Брэгга $\theta_B(f)$ в различных срезах плоскостей *YZ* и *XZ* приведены на рис. 1. Сплошные и пунктирные кривые на графиках отвечают вариантам анизотропного рассеяния медленной (*s*) и быстрой (*f*) оптических мод соответственно. Например, ветвь $+1f$ отображает процесс рассеяния быстрой оптической моды в +1-й дифракционный порядок. Частоты АО-синхронизма нормированы на величину фазовой скорости сдвиговой моды, выраженную в км/с. Особыми точками Ф показаны рабочие точки спектрально-поляриметрических АОПФ (далее будем называть их просто АОПФ). Из графиков ясно, что в плоскости *YZ* в области $\theta_B > 0°$ можно выделить два различных режима СП-геометрии – среднечастотный (СЧ) и ВЧ. Оба этих режима существуют в диапазоне углов среза от нулевого до предельного ($\chi_c \approx 6{,}3°$). Кроме того, во всех срезах данной плоскости при $\theta_B < 0°$ реализуется еще один, низкочастотный (НЧ) режим СП-геометрии [4]. Плоскость *XZ* кристалла InI не отличается столь широким разнообразием вариантов СП-дифракции. В ней существует единственный такой режим, реализующийся при углах падения, близких к 90°. Дальнейший анализ характеристик СП-геометрии в кристалле йодида индия проводился для ее СЧ- и ВЧ-вариантов, реализующихся в плоскости *YZ*.

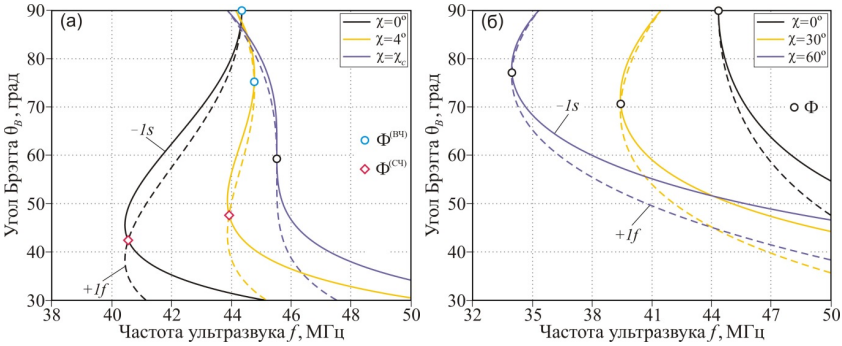


Рис. 1. Частотные зависимости углов Брэгга в плоскостях YZ (а) и XZ (б) йодида индия

Пространственная структура АО-синхронизма в условиях указанных режимов дифракции представлена на рис. 2, *а*. Сплошными и штрихпунктирными кривыми показаны углы падения (θ_0) и частоты ультразвука (f_0), взятые в рабочих точках Ф, как функции угла среза χ. Особенности формы такой структуры в двуосных кристаллах изучены в работе [4]. В основном они заключаются в существенно отличных от нуля значениях θ_0 и f_0 для СЧ-геометрии при $\chi = 0°$, а также в ощутимо бóльших, в сравнении с одноосными кристаллами, значениях угла θ_0 при $\chi = \chi_c$. В предельном срезе йодида индия $\theta_0 \approx 59{,}3°$, тогда как, например, в одноосном кристалле Hg_2Cl_2 $\theta_0(\chi_c) \approx 42°$. Далее будет показано, что эта уникальная особенность СП-дифракции в двуосных кристаллах открывает возможности для создания АОПФ с одновременно высоким спектральным и пространственным разрешением.

Основные параметры АОПФ, использующих изучаемые здесь варианты СП-геометрии в плоскости *YZ* кристалла йодида индия представлены на рис. 2, *б*. Штрихпунктирными и сплошными кривыми показаны соответственно угловая апертура $\Delta\theta$ (в воздухе) и спектральное разрешение *R* того из каналов, в котором эти величины имеют худшее значение. В расчетах эффективность дифракции в рабочем порядке составляла 10%; эффективная длина АО-взаимодействия для процесса $f \rightarrow s$ выбиралась равной 3 см. Центр поля зрения АО-фильтра совмещался с рабочей точкой Ф. Изломы на зависимости $\Delta\theta(\chi)$ для ВЧ-геометрии обусловлены ограничением поля зрения АОПФ углом отклонения оптического пучка. Нетрудно видеть, что наиболее широкую апертуру ($\Delta\theta \approx 12°$) имеют АОПФ в срезах с $\chi \approx \chi_c$. Однако такие фильтры обладают сильной асимметрией угловой характеристики, что заметно усложняет процедуру их калибровки. Поэтому для осуществления фильтрации изображений целесообразно использовать АОПФ в срезах, несколько меньших предельного.

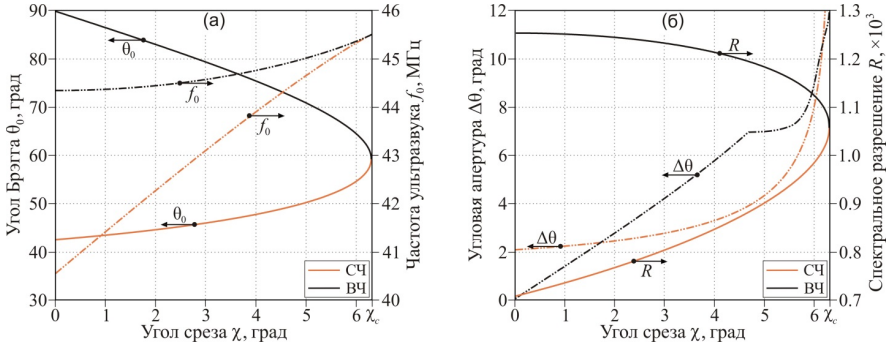


Рис. 2. Пространственная структура синхронизма (а), основные характеристики АОПФ (б)

Подходящими характеристиками обладает СЧ АО-фильтр в срезе с $\chi = 6°$, имеющий угловую апертуру 8,2° и спектральное разрешение $R \approx 985$. Для сравнения: угловая апертура АОПФ на кристалле каломели (Hg_2Cl_2) при той же

длине АО-взаимодействия не превышает 4° (для излучения с $\lambda = 10{,}6$ мкм). Столь существенная разница в апертурах обусловлена сильной угловой селективностью СП-дифракции в кристалле Hg_2Cl_2 в сагиттальном направлении.

Таким образом, полученные результаты подтверждают перспективность использования кристалла йодида индия в неколлинеарных АО-фильтрах дальнего ИК-диапазона, что делает актуальным дальнейшее изучение его свойств.

Библиографический список

1. Voloshinov V. B., Molchanov V. Ya., Mosquera J. S. Spectral and polarizational analysis imagine by means of acousto-optic // Opt. and las. tec. 1996. Vol. 28, № 2. P. 119–127.

2. Krauz L., Pata P., Bednar J., Klima M. Quasi-collinear IR AOTF based on mercurous halide single crystals for spatio-spectral hyperspectral imagining // Opt. Express. 2021. Vol. 29, № 9. P. 12813–12832.

3. Indium iodide single crystal: breakthrough material for infrared acousto-optics / D. L. Porokhovnichenko, E. A. Dyakonov, S. V. Kuznetsov [et al.] // Opt. Lett. 2020. Vol. 45, № 13. P. 3435–3438.

4. Kupreychik M. I., Balakshy V. I., Mantsevich S. N. Spectral-polarization acousto-optic filtration based on alpha-iodic acid biaxial crystals // Proc. of IEEE (WECONF). 2022.

УДК 534.522.1

С. Н. Манцевич*
доктор физико-математических наук, профессор
Г. Д. Слиньков*
аспирант
*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

ВЛИЯНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА СПЕКТРАЛЬНОЕ ПРОПУСКАНИЕ КОЛЛИНЕАРНЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК

Наличие расходимости у световых пучков влияет на характеристики акустооптической (АО) дифракции, приводит к снижению эффективности АО-взаимодействия и трансформации аппаратной функции АО-устройств: полоса пропускания увеличивается, а боковые максимумы сглаживаются. Предложено скомпенсировать влияние расходимости света при помощи цепи оптоэлектронной обратной связи, соединяющей оптический выход АО-ячейки и ее пьезопреобразователь. Показано, что введение обратной связи позволяет уменьшить полуширину и увеличить спектральный контраст аппаратной функции. При этом максимально возможная эффективность АО-дифракции будет по-прежнему определяться расходимостью светового пучка, поскольку наличие обратной связи не влияет на передаточную функцию АО-устройства.
Ключевые слова: акустооптика, коллинеарная дифракция, обратная связь, аппаратные и передаточные функции.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-12-00057.

S. N. Mantsevich*
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor
G. D. Slinkov*
PhD Student
*M. V. Lomonosov Moscow State University

OPTOELECTRONIC FEEDBACK INFLUENCE ON THE SPECTRAL TRANSMISSION OF COLLINEAR ACOUSTO-OPTIC CELLS

The presence of light beams divergence affects the characteristics of acousto-optic (AO) diffraction. It leads to a decrease in the AO interaction efficiency and transformation of the AO devices transmission function - its bandwidth increases and the side lobes are smoothed. It is proposed to compensate the light divergence effect on the transmission functions applying an optoelectronic feedback circuit connecting the AO cell optical output and its piezoelectric transducer. It is shown that the introduction of feedback makes it possible to narrow the passband and increase the spectral contrast of the transmission function. But, the maximum possible AO diffraction efficiency will be still determined by the optical beam divergence, since the feedback does not affect the AO device transfer function.
Keywords: acousto-optics, quasicollinear diffraction, paratellurite, acoustic field.

Введение

Акустооптические (АО) устройства широко применяются для решения различных технических задач как оптики и оптоэлектроники, так и лазерной

техники и спектроскопии [1]. Одним из примеров является спектральная фильтрация оптического излучения, в том числе фильтрация изображений. В этом случае оптические пучки, проходящие через АО-ячейку, обладают некоторой расходимостью. Наличие расходимости означает, что различные компоненты пространственного спектра света будут распространяться в АО-ячейке по разным направлениям, и, следовательно, условие АО-синхронизма будет выполняться только для некоторых из них.

Способность АО-устройства передавать различные компоненты пространственного спектра оптического пучка характеризуется передаточной функцией [2]. Расчет передаточной функции позволяет определить угловую апертуру АО-ячейки (по уменьшению эффективности АО-дифракции в 2 раза), смоделировать трансформацию ее аппаратной функции и изменение полосы пропускания с увеличением расходимости оптического пучка. Увеличение расходимости света приводит к снижению максимально возможной эффективности АО-взаимодействия, увеличению полосы пропускания и расширению аппаратной функции. При этом боковые максимумы аппаратной функции сглаживаются [3].

В данной работе экспериментально исследуется возможность компенсации влияния расходимости света на аппаратную функцию АО-устройства посредством введения цепи оптоэлектронной обратной связи. Исследование проведено на примере коллинеарного акустооптического взаимодействия. Данная геометрия является частным случаем высокочастотного варианта широкоугольной геометрии АО-дифракции. Обратная связь соединяет оптический выход коллинеарной АО-ячейки и ее пьезоэлектрический преобразователь [4]. Сигнал обратной связи формируется за счет специфических особенностей изменения поляризации света при коллинеарной АО-дифракции [5].

Описание исследуемой системы

Схема исследуемой системы приведена на рис. 1. Ее ключевым элементом является коллинеарная АО-ячейка из кристалла молибдата кальция с длинной взаимодействия 4 см.

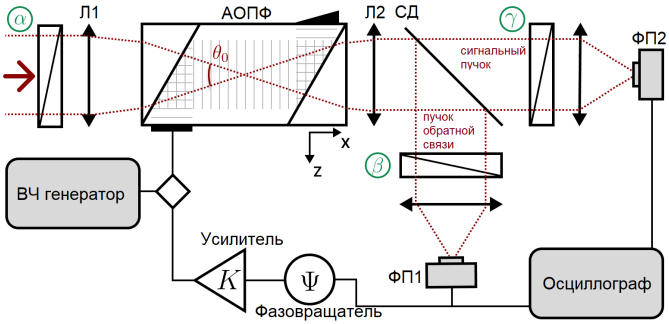


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Действие системы основано на особенностях изменения поляризации света при коллинеарной АО-дифракции, которые при определенной взаимной ориентации входного и выходного поляризаторов позволяют получить амплитудную модуляцию выходного оптического излучения с частотой, равной частоте ультразвука, возбуждаемого в АО-ячейке.

Для реализации амплитудной модуляции светового излучения плоскости поляризации входного и выходного поляризаторов должны быть ориентированы следующим образом: плоскость поляризации входного поляризатора – вдоль кристаллографической оси Z или Y, выходного – под углом 45° к плоскости поляризации входного. Для реализации спектральной фильтрации плоскость поляризации входного поляризатора – вдоль кристаллографической оси Z или Y, а выходного – ортогонально к ней.

Таким образом, для реализации спектральной фильтрации при наличии цепи обратной связи на выходе АО-фильтра требуется разделить световой пучок на два (сигнальный пучок и пучок обратной связи) с помощью светоделителя (СД) и установить после него два поляризатора с различными ориентациями плоскостей поляризации. Амплитудная модуляция интенсивности пучка обратной связи регистрируется фотоприемником (ФП1), формирующим входной сигнал обратной связи. Интенсивность сигнального пучка также регистрируется фотоприемником (ФП2) и служит для определения спектральных характеристик системы.

В отличие от предыдущих работ, где световой пучок был коллимированным, в данном исследовании рассмотрен вариант, когда пучок обладает значительной расходимостью. Для получения расходящегося светового пучка были использованы телескоп и собирающая линза (Л1), установленная после телескопа и фокусирующая свет в центре АО-ячейки. Дифрагированное световое излучение проходило через собирающую линзу (Л2), установленную на выходе АО-ячейки, и пучок снова становился коллимированным.

Сигнал фотоприемника ФП1 подается на вход цепи обратной связи, включающей усилитель и фазовращатель, складывается с сигналом ВЧ-генератора и подается на пьезопреобразователь АО-ячейки.

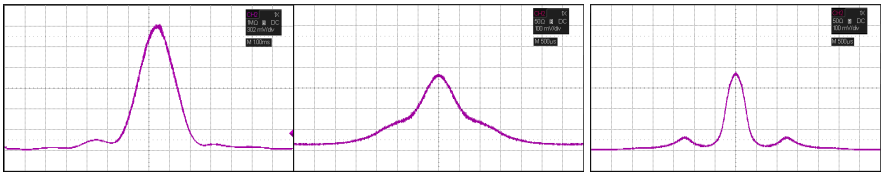
Результаты и их анализ

Экспериментально изучено влияние коэффициента усиления цепи обратной связи и амплитуды сигнала ВЧ-генератора на форму аппаратных и передаточных функций коллинеарной АО-дифракции.

На рис. 2 приведены осциллограммы аппаратных функций коллинеарного АО-фильтра для расходимости оптического пучка 1,5° (*а*) и 7,5° (данная величина соответствует угловой апертуре исследуемого АО-фильтра) (*б*) при выключенной обратной связи и расходимости 7,5° при включенной обратной связи.

Осциллограммы на рис. 2, *б* и 2, *в* представлены в одинаковом масштабе, осциллограмма на рис. 2, *а* получена при вдвое большем времени развертки и в три раза большей цене деления по вертикальной оси. Сопоставляя приведенные

на рис. 2, *а* и 2, *б* характеристики, можно отметить, что увеличение расходимости до 7,5° приводит к уменьшению эффективности АО-взаимодействия примерно в 2 раза и увеличению полосы пропускания в 1,5 раза.



а *б* *в*

Рис. 2. Аппаратные функции коллинеарного АО-фильтра:
а – расходимость 1,5° без обратной связи; б – расходимость 7,5° без обратной связи;
в – расходимость 7,5° с обратной связью

При включении обратной связи (рис. 2, *в*) наблюдаемая картина существенно меняется. Максимальная эффективность АО-взаимодействия остается равной той, которая наблюдается без обратной связи, поскольку она определяется формой передаточной функции АО-ячейки, на которую обратная связь не оказывает влияния. Однако полоса пропускания устройства существенно сужается, появляются боковые максимумы, спектральный контраст увеличивается. В представленном случае введение обратной связи позволяет примерно в 2 раза снизить мощность сигнала, подаваемого с ВЧ-генератора.

Величина сужения аппаратной функции при фиксированном значении коэффициента усиления цепи обратной связи близком к пороговому (500 раз по амплитуде) определяется амплитудой сигнала ВЧ-генератора. Чем меньше амплитуда, тем большего уменьшения полосы пропускания можно достичь. Для выбранной величины расходимости светового пучка минимальное сужение полосы пропускания составило 1,6 раза (мощность сигнала генератора 1,2 Вт), а максимальное – более 20 (0,3 мВт). При этом эффективность АО-взаимодействия уменьшилась от 0,5 до 0,03. При мощности сигнала генератора 20 мВт эффективность АО-дифракции составила 0,23, сужение полосы пропускания – 7 раз, спектральный контраст увеличился более чем в 40 раз.

Выводы

Исследована возможность компенсации влияния расходимости светового пучка на аппаратную и передаточную функции коллинеарной АО-дифракции при помощи цепи оптоэлектронной обратной связи. Показано, что включение обратной связи позволяет сузить полосу пропускания АО-устройства и увеличить спектральный контраст его аппаратной функции. При этом чем меньше мощность сигнала, подаваемого на пьезопреобразователь АО-ячейки с ВЧ-генератора, тем большего сужения полосы пропускания можно достичь.

Библиографический список

1. Goutzoulis A. Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices. N. Y.: Marcel Dekker, 1994.

2. Балакший В. И. Акустооптическая ячейка как фильтр пространственных частот // Радиотехника и электроника. 1984. Т. 29, № 8. С. 1610–1616.

3. Balakshy V. I., Mantsevich S. N. Collinear diffraction of divergent optical beams in acousto-optic crystals // Applied optics. 2009. Vol. 48, № 7. P. C135–C140.

4. Balakshy V. I., Kuznetsov Yu. I., Mantsevich S. N. Effect of optoelectronic feedback on the characteristics of acousto-optical collinear filtering // Quantum Electronics. 2016. Vol. 46, № 2. P. 181–184.

5. Балакший В. И., Манцевич С. Н. Влияние поляризации света на характеристики коллинеарной акустооптической дифракции // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 106, № 3. С. 499–503.

УДК 535.36:534.23

П. А. Никитин
кандидат физико-математических наук
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»

О ВЛИЯНИИ ШИРИНЫ ЗАЗОРА МЕЖДУ СЕКЦИЯМИ ЭЛЕКТРОДА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ДЕФЛЕКТОРА НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИ ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ

Рассмотрена квазиортогональная геометрия акустооптического взаимодействия в оптически изотропной среде. Проведено сравнение акустооптического дефлектора, использующего полностью покрытый электродом пьезоэлектрический излучатель, с дефлектором с секционированным излучателем. Показано, что наличие зазора между секциями электрода должно влиять на характеристики акустооптического дефлектора. Рассчитаны передаточные функции дефлектора с восемью секциями. Установлено, что при оптимальном угле падения излучения увеличение зазора между секциями электрода приводит к сужению частотной характеристики дефлектора, тогда как при угле падения излучения, соответствующем провалу в 50% в центре частотной характеристики, рабочая полоса частот дефлектора наоборот расширяется при увеличении зазора между секциями электрода.
Ключевые слова: акустооптика, дифракция, секционированный излучатель, дефлектор.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FFNS-2022-0009.

P. A. Nikitin
PhD, Phys.-Math.
Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation
of the Russian Academy of Sciences
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

ON THE EFFECT OF THE GAP WIDTH BETWEEN ELECTRODE SECTIONS ON THE CHARACTERISTICS OF AN ACOUSTO-OPTIC DEFLECTOR BASED ON AN OPTICALLY ISOTROPIC MEDIUM

The quasi-orthogonal geometry of the acousto-optic interaction in an optically isotropic medium is considered. A comparison is made between an acousto-optic deflector using a piezoelectric transducer completely covered with an electrode and a deflector with a sectioned transducer. It is shown that the presence of a gap between the electrode sections should affect the characteristics of the acousto-optic deflector. The transfer functions of the deflector with eight sections are calculated. It has been established that at an optimal angle of incidence of radiation, an increase in the gap between the electrode sections leads to a narrowing of the frequency response of the deflector, while at an angle of incidence of radiation corresponding to a dip of 50% in the center of the frequency response, the working frequency band of the deflector, on the contrary, expands with an increase in the gap between the sections of the electrode.
Keywords: acousto-optics, diffraction, sectioned transducer, deflector.

Введение

Акустооптическое (АО) взаимодействие состоит в дифракции излучения на фазовой дифракционной решетке, наведенной в среде ультразвуковой волной. Поэтому, изменяя параметры ультразвукового пучка, можно в реальном времени управлять пучком дифрагированного излучения [1]. К настоящему времени разработано множество устройств, использующих АО-метод: модуляторы, дефлекторы, фильтры. Лучших характеристик удалось добиться при использовании двулучепреломляющих монокристаллов в качестве среды АО-взаимодействия [2]. Выбор того или иного материала определяется поставленной задачей. В то же время немаловажную роль играет прозрачность материала в рабочем спектральном диапазоне. Согласно литературным данным, многие двулучепреломляющие монокристаллы не прозрачны в ТГц-диапазоне (длина волны излучения $\lambda \approx 100$ мкм). Поэтому АО-устройства для этого диапазона должны изготавливаться из оптически изотропных сред [3; 4]. Цель данной работы – моделирование работы АО-дефлектора на основе оптически изотропной среды, в том числе использующего секционированный излучатель ультразвука, а также изучение влияния ширины зазора между секциями электрода на характеристики дефлектора.

Модель акустооптического дефлектора

Назначение АО-дефлектора – сканирование пучком дифрагированного излучения в широком угловом диапазоне. Сканирование осуществляется путем изменения частоты ультразвука, а диапазон рабочих частот определяется геометрией АО-взаимодействия. Поскольку эффективная АО-дифракция наблюдается лишь при небольшом отклонении от условия брэгговского синхронизма, то обычно используется геометрия, когда волновой вектор ультразвука направлен по касательной к волновой поверхности дифрагированного излучения. Это возможно обеспечить в двулучепреломляющей среде. Если же среда является оптически изотропной, то диапазон рабочих частот существенно сужается. Для его расширения в работах [5; 6] было предложено использовать секционированный излучатель ультразвука (m – число секций), а сигнал подавать на соседние секции в противофазе ($\Phi = \pi$). В этом случае диаграмма направленности излучателя ультразвука имеет два основных лепестка, что приводит к тому, что эффективная мощность ультразвука, участвующего в АО-взаимодействии, уменьшается в 2 раза. Это важный недостаток, но он компенсируется тем, что при изменении частоты ультразвука его эффективный волновой фронт поворачивается и расстройка от условия фазового синхронизма уменьшается. В результате удается добиться расширения рабочей полосы частот ультразвука и увеличения числа разрешенных элементов АО-дефлектора примерно в 4 раза.

Зависимость эффективности дифракции ξ от угла θ падения излучения и частоты ультразвука F дается следующими выражениями:

$$\xi = \left(\frac{1}{16}k_0^2 p^2 n^6 S^2\right) D_1^2 \left(\frac{\sin(\kappa D_1/2)}{\kappa D_1/2}\right)^2 \left(\frac{\sin(\kappa L_1 - \Phi)m/2}{\sin(\kappa L_1 - \Phi)/2}\right)^2, \qquad (1)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad k = k_0 n; \quad K = \frac{2\pi F}{V}; \quad \kappa = K\left(\theta - \frac{K}{2k}\right), \qquad (2)$$

$$p = \sqrt{M_2 \frac{\rho V^3}{n^6}}; \quad S = \sqrt{\frac{P_a}{0.5\rho V^3 d \cdot (m \cdot D_1)}}; \quad D_1 = C_D L_1; \quad L_1 = \frac{L}{m}, \qquad (3)$$

где L и d – длина и ширина излучателя ультразвука; L_1 – длина одной секции; D_1 – длина секции одного электрода, задаваемая через коэффициент C_D; V – скорость ультразвука; n – показатель преломления; p – эффективная фотоупругая постоянная; M_2 – коэффициент АО-качества среды.

Результаты и обсуждение

При анализе были использованы безразмерные нормированные параметры f, φ и ξ_{norm}:

$$F = f \cdot \sqrt{\frac{nV^2}{\lambda L_1}} = f \cdot F_0; \quad \theta = \varphi \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{nL_1}} = \varphi \cdot \theta_0;$$
$$\xi = \xi_{\text{norm}} \cdot \left(\frac{2M_2 P_a L}{\lambda^2 d}\right). \qquad (4)$$

Учитывая, что разность фаз между соседними секциями $\Phi = \pi$, было получено следующее выражение для нормированной эффективности дифракции:

$$\xi_{\text{norm}} = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi f(-2\varphi + f)C_D}{2}\right)\sin^2\left(\frac{\pi\left(f^2 - 2f\varphi + 1\right)m}{2}\right)}{m^2 C_D f^2 (-2\varphi + f)^2 \cos^2\left(\frac{\pi f(-2\varphi + f)}{2}\right)}. \qquad (5)$$

Поскольку при изменении зазора между секциями меняется и максимальная достижимая эффективность АО-дифракции, то для удобства анализа полученные зависимости были нормированы на единицу (рис. 1). В этом случае из графиков легко получать информацию о ширине рабочего диапазона частот ультразвука и углов падения излучения.

На основании полученных зависимостей были простроены серии графиков частотных характеристик АО-дефлектора для различных углов падения излучения (рис. 2). Из графиков на рис. 2 следует, что при заданной длине излучателя ультразвука и при заданном числе секций (на примере $N = 8$) увеличение

зазора между секциями (уменьшение коэффициента C_D) приводит к сужению рабочей полосы частот АО-дефлектора при «оптимальном» угле падения излучения ($\theta = \theta_0$) с $\Delta F = 0{,}71F_0$ при $C_D = 1$ до $\Delta F = 0{,}67F_0$ при $C_D = 0{,}2$.

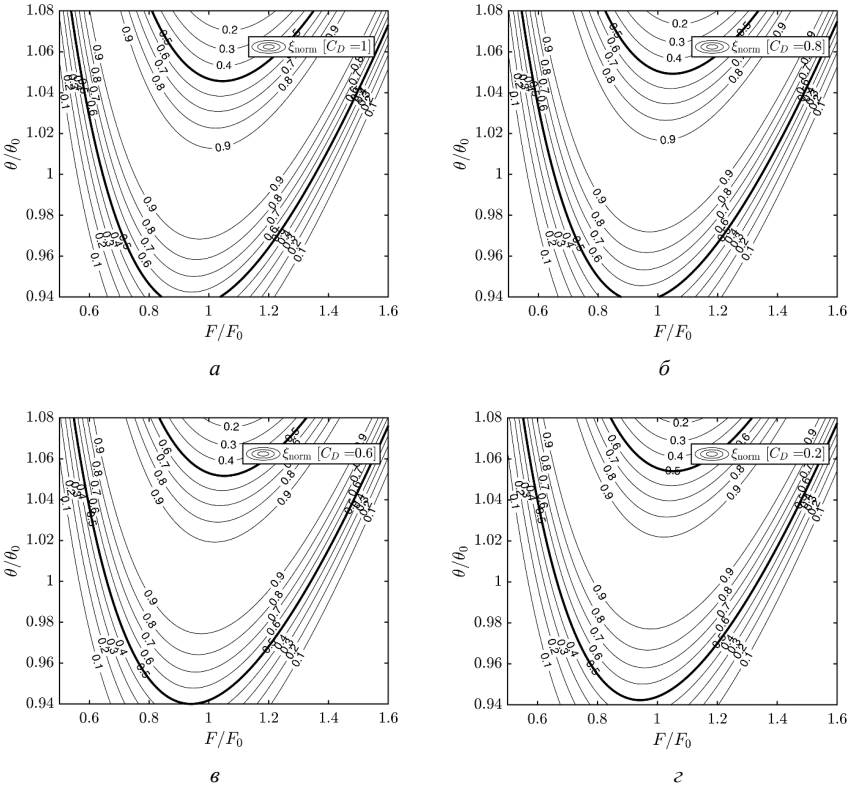


Рис. 1. Нормированная на единицу передаточная функция АО-дефлектора для различных величин зазора между секциями электрода при числе секций m = 8: а – $C_D = 1$; б – $C_D = 0{,}8$; в – $C_D = 0{,}6$; г – $C_D = 0{,}2$

Отметим также особенность работы АО-дефлектора в другом режиме, когда угол падения излучения не является «оптимальным» и соответствует провалу в 50% в центре частотной характеристики. В этом случае увеличение зазора между секциями наоборот приводит к уширению рабочей полосы частот АО-дефлектора с $\Delta F = 0{,}936F_0$ при $C_D = 1$ до $\Delta F = 0{,}944F_0$ при $C_D = 0{,}2$.

Из графиков на рис. 2 также видно, что при заданном угле падения излучения провал в центре является более ярко выраженным при меньших зазорах между секциями излучателя.

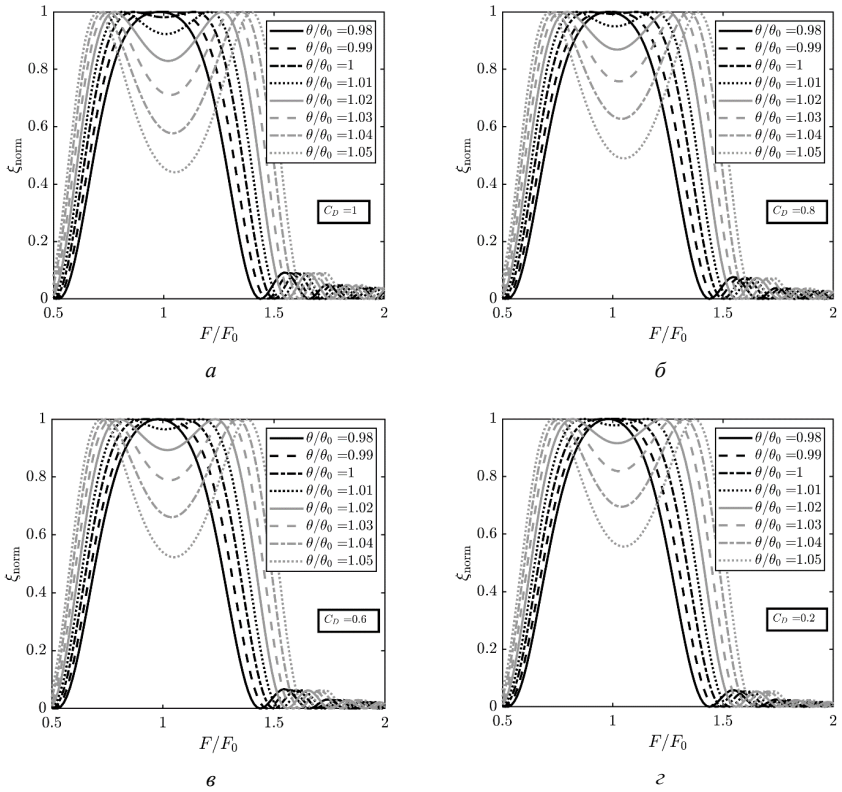


Рис. 2. Зависимость нормированной эффективности дифракции от частоты ультразвука для различных величин зазора между секциями электрода при числе секций m = 8: а – C_D = 1; б – C_D = 0,8; в – C_D = 0,6; г – C_D = 0,2

Заключение

Установлено, что зазор между секциями излучателя ультразвука влияет на характеристики АО-дефлектора. Показано, что увеличение зазора приводит к меньшей чувствительности к юстировке. Выбор зазора определяется также требованиями к уровню эффективности АО-дифракции и числу разрешенных световых пятен.

Библиографический список

1. Real-time device tracking under MRI using an acousto-optic active marker / Y. S. Yaras, D. K. Yildirim, D. A. Herzka // Magn Reson Med. 2021. Vol. 85, № 5. P. 2904–2914.

2. Machikhin A., Gorevoy A., Batshev V. I., Pozhar V. E. Modes of wide-aperture acousto-optic diffraction in a uniaxial birefringent crystal // J. Opt. 2021. Vol. 23, № 12. Art. n. 125607.

3. Nikitin P. A., Gerasimov V. V., Khasanov I. S. Acousto-optic modulation and deflection of terahertz radiation // Materials. 2022. Vol. 15, № 24. Art. n. 8836.

4. Durr W. Acousto-optic interaction in gases and liquid bases in the far infrared // Int. J. of Infrared and Millim. Waves. 1986. Vol. 7, № 10. P. 1537–1558.

5. Gordon E. I. A review of acoustooptical deflection and modulation devices // Proc. of the IEEE. 1966. Vol. 54, № 10. P. 1391–1401.

6. Antonov S., Proklov V., Rezvov Y., Vainer A. Two-element phased-array acousto-optic deflector at high diffraction efficiency: scanning range broadening // Univ. J. of Phys. and Appl. 2014. Vol. 2, № 2. P. 90–95.

УДК 534.8

Н. В. Поликарпова*
кандидат физико-математических наук, доцент
Е. А. Дьяконов*
кандидат физико-математических наук
И. К. Чиж*
студент
*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В РАЗЛИЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ В КРИСТАЛЛЕ ПАРАТЕЛЛУРИТА

Представлены результаты исследования отражения объемной акустической волны в кристалле диоксида теллура. Исследованы многократные отражения акустических волн от двух свободных границ, разделяющих кристалл и вакуум. Для этого используется особая конфигурация кристалла в виде тетрагональной призмы с двумя параллельными и двумя взаимно наклоненными гранями. Пьезоэлектрический преобразователь генерирует квазипоперечную акустическую волну с углом сноса между акустической фазой и групповой скоростью, равным 74°. Исходная волна генерируется преобразователем при угле падения более 90°. Снос акустической энергии обеспечивает падение волны на наклонную границу кристалла. Падение сопровождается своеобразным ближним отражением собственной волны от наклонной грани. Доказано, что в плоскости (001) материала может распространяться до пяти медленных квазипоперечных акустических волн. Эти волны распространяются вдоль разных направлений, каждое из которых характеризуется определенным углом сноса. Рассчитаны и измерены параметры отраженных волн, такие как направления распространения, фазовые скорости и углы сноса, коэффициенты отражения и затухания. Все эти параметры определяются акустооптическими методами, включая шлиренвизуализацию и методы лазерного зондирования. Для этого призма освещена расширенными и сфокусированными лазерными лучами. На основании полученных результатов рассмотрена возможность разработки новой модификации квазиколлинеарного перестраиваемого акустооптического фильтра. Предложенный фильтр использует исследованное многократное отражение акустических волн в парателлурите. Как показано, медленные сдвиговые акустические волны могут запускаться в кристалле за счет многократных акустических отражений, а также за счет трансформации акустических мод, происходящей после отражений. Мы предлагаем использовать акустооптическое взаимодействие в плоскости (001) кристалла. В этом случае на боковые грани призмы можно одновременно направить несколько оптических лучей, коллинеарных потокам акустической энергии. Исследована геометрия акустооптического взаимодействия в кристалле. На основании требования условия согласования Брэгга рассчитаны частотные зависимости оптических углов падения от частоты ультразвука. Найдены оптимальные геометрии квазиколлинеарной дифракции света на акустических волнах. По сравнению с традиционными модификациями фильтров, предлагаемый прибор можно назвать оптическим многоканальным устройством, способным работать одновременно с несколькими оптическими лучами.
Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, анизотропия упругих свойств, парателлурит.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-12-00072.

N. V. Polikarpova*
PhD, Phys.-Math., Associate Professor

E. A. Dyakonov*
PhD, Phys.-Math.
I. K. Chizh*
Student
*M. V. Lomonosov Moscow State University

INVESTIGATION OF THE ATTENUATION COEFFICIENT OF AN ULTRASONIC WAVE IN VARIOUS DIRECTIONS IN A PARATELLURITE CRYSTAL

We present results on a study of acoustic bulk wave reflection in the tellurium dioxide crystal. Multiple reflections of the acoustic waves from two free boundaries separating the crystal and the vacuum are examined. For the purpose, we employ a special configuration of the crystal in form of a tetragonal prism having two parallel and two mutually inclined facets. A piezoelectric transducer generates a quasi-shear acoustic wave with the walk-off angle between acoustic phase and group velocity equal to 74°. The initial wave is generated by the transducer at an incidence angle exceeding 90°. The acoustic energy walk-off provided the wave incidence on the inclined crystal boundary. The incidence is accompanied by a peculiar close-to-back reflection of the intrinsic wave from the inclined facet. It is proved that as much as five slow quasi-shear acoustic waves could propagate in the plane (001) of the material. These waves propagate along different directions each characterized by a specific walk-off angle. We calculate and measure parameters of the reflected waves such as the directions of propagation, the phase velocities and walk-off angles, the reflection and attenuation coefficients. All these parameters are determined by the acousto-optic methods including the Schlieren imaging and the laser probing methods. The prism is illuminated for the purpose by expanded and focused laser beams. Based on the obtained results, we examine a possibility to develop a new modification of a quasi-collinear tunable acousto-optic filter. The filter applies the studied multiple reflections of the acoustic waves in paratellurite. As shown, the slow shear acoustic waves may be launched in the crystal due to the multiple acoustic reflections and also due to transformation of acoustic modes taking place after the reflections. We propose usage of the acousto-optic interaction in the (001) plane of the crystal. In this case, a few optic beams could simultaneously be sent on the side facets of the prism collinearly with the acoustic energy flows. Acousto-optic interaction geometries are examined in the crystal. Based on the requirement of Bragg matching condition, we calculate frequency dependences of the optic incidence angles on the frequency of ultrasound. Optimal geometries of the quasi-collinear light diffraction by the acoustic waves are found. As compared to the traditional modifications of the filters, the proposed instrument may be called an optical multichannel device capable of a simultaneous operation with a several optical` beams.
Keywords: acousto-optic interaction, anisotropy, paratellurite.

Введение

Кристалл парателлурита – один из наиболее часто применяемых материалов для акустооптических устройств. К основным особенностям парателлурита относится его сравнительно высокий коэффициент акустооптического качества, а также сильно выраженная анизотропия скоростей оптических и акустических волн, позволяющая реализовать множество разнообразных геометрий взаимодействия [1]. Важным свойством любого материала, применяемого в акустоэлектронике и акустооптике, является коэффициент затухания ультразвуковых волн. Поскольку эта величина пропорциональна квадрату частоты, именно она определяет практические пределы частотного диапазона устройства. Коэффициенты затухания чистых акустических мод в большинстве практически интересных материалов были измерены многими исследователями и весьма досто-

верно известны из литературы [2]. Очевидно, что в силу анизотропных свойств любого кристалла, коэффициент акустического затухания, так же как и скорость звука, зависит от направления распространения волны. Однако данные о конкретных величинах акустического затухания собственных мод, распространяющихся в произвольных кристаллографических направлениях, в настоящее время отсутствуют. Сильная анизотропия скорости звука в кристалле парателлурита приводит также к сильной анизотропии акустического затухания [3]. Например, медленная акустическая мода, распространяющаяся в направлениях [110] и [100] со скоростями 616 и 3100 м/с, характеризуется коэффициентами затухания, равными соответственно 16,0 и 3,4 дБ/(мкс-ГГц^2). Таким образом, выяснение характера зависимости коэффициента акустического затухания от направления в кристалле парателлурита представляет особую важность. В работе [3] была построена теоретическая модель такой зависимости, однако она не подкреплена экспериментальными данными в промежуточных точках. Одна из наиболее интересных собственных мод кристалла парателлурита [4; 5] – медленная квазипоперечная волна, распространяющаяся в плоскости (001) под углом 8° к оси [110]. Она характеризуется углом сноса энергии, равным 74,3°. Данное значение является максимально возможным не только среди собственных мод кристалла парателлурита, но и вообще среди известных кристаллических материалов [1]. Экспериментальная оценка коэффициента затухания ультразвуковой волны с максимальным углом сноса и стала целью настоящей работы.

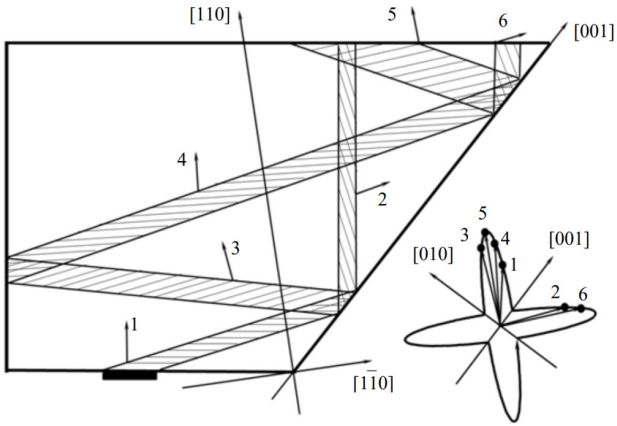


Схема акустооптической ячейки и геометрия волновых векторов ультразвука на поверхности обратных скоростей

Измерения проводились акустооптическим методом [4] в ячейке, схематично показанной на рисунке. Стрелка и цифра на рисунке возле каждого из волновых пучков соответствуют направлению его волнового вектора и услов-

ному номеру в тексте и таблице. В квадратных скобках – направления кристаллографических осей.

Конфигурация кристалла специально рассчитана так, чтобы в нем существовало несколько акустических пучков с углами сноса энергии, близкими к максимальному. Квазипоперечная ультразвуковая волна 1 возбуждается сдвиговым пьезопреобразователем, направление колебаний которого находится в плоскости рисунка. Одновременно с ней возбуждается еще одна собственная акустическая мода, не представляющая интереса в нашем исследовании и не показанная на рисунке. При падении волны 1 на смежную грань кристалла возникают две отраженные волны, обозначенные соответственно цифрами 2 и 3. В свою очередь, волна 3 отражается от противоположной грани кристалла, порождая волну 4, и т. д. Углы среза всех граней подобраны так, чтобы обеспечить наличие в ячейке волн с максимальными углами сноса энергии, а также по возможности наибольшую длину акустических столбов. Последнее условие необходимо для повышения точности измерения акустического затухания. Расчетные характеристики волн, распространяющихся в кристалле, приведены в таблице. Для углов сноса энергии даны абсолютные значения. Расчеты были выполнены на основе данных из литературы [2] в соответствии с методикой, изложенной в работе [6].

Характеристики акустических волн, распространяющихся в кристалле

Усл. №	Фазовая скорость, м/с	Направление волнового вектора отн. оси [001], град.	Направление лучевого вектора отн. оси [001], град.	Угол сноса энергии, град.	Групповая скорость, м/с
1	870	37,0	–37,3	74,3	3215
2	870	–37,0	37,3	74,3	3215
3	707	49,5	121,4	72,0	2288
4	727	40,1	–32,5	72,6	2431
5	642	37,3	109,7	62,4	1386
6	727	–40,1	32,5	72,6	2431

Для измерения коэффициента затухания в настоящей работе использованы волновые пучки 2 и 4. Измерения выполнены при нескольких значениях частоты в диапазоне от 120 до 185 МГц, затем все результаты приведены к частоте 1 ГГц в предположении квадратичной зависимости затухания от частоты. Найденный таким образом коэффициент затухания пучка 4 составляет (15,2 ± 1,2) дБ/(мкс-ГГц^2). Волновой пучок 2 характеризуется значительно меньшим затуханием, величина которого поддается лишь грубой оценке и не превышает 7 дБ/(мкс-ГГц^2). Можно полагать, что коэффициент затухания квазисдвиговых ультразвуковых волн, распространяющихся под небольшими углами (порядка нескольких градусов) к оси [110], лишь незначительно отличается от коэффициента затухания чистой сдвиговой моды в данном направлении. Однако дальнейшее отклонение волнового вектора ультразвука от оси [110] приводит к резкому снижению коэффициента затухания. Подобный характер зависимости акустического затухания от направления был теоретически пред-

сказан в работе [3] для другой кристаллографической плоскости парателлурита. Сделанные оценки коэффициентов затухания представляют практическую важность при разработке акустооптических фильтров [1], использующих квазиколлинеарную геометрию взаимодействия вблизи кристаллографической оси [110].

Библиографический список

1. Voloshinov V. B., Polikarpova N. V. Application of Acousto-Optic Interactions in Anisotropic Media for Control of Light Radiation // Acta Acustica united with Acustica. 2003. Vol. 89, № 6. P. 930.

2. Акустические кристаллы. Справочник / под ред. М. П. Шаскольской. М.: Наука, 1982.

3. Ахмеджанов Ф. Р., Азаматов З. Т., Болтабаев А. Ф., Рахимов Э. Т. Анизотропия затухания акустических волн в кристаллах парателлурита // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2014. Т. 5. С. 145333.

4. Дьяконов Е. А., Волошинов В. Б., Поликарпова Н. В. Акустооптическое исследование необычных случаев отражения объемных упругих волн в кристалле парателлурита // Акустический журнал. 2012. Т. 58, № 1. С. 121.

5. Дьяконов Е. А., Волошинов В. Б., Поликарпова Н. В. Полуколлинеарный режим дифракции света на ультразвуке в среде с сильной упругой анизотропией // Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 118, № 1. С. 172.

6. Поликарпова Н. В., Волошинов В. Б., Иванова П. А. Отражение плоских акустических волн при наклонном падении на грань кристалла диоксида теллура // Акустический журнал. 2019. Т. 65, № 6. С. 740.

УДК 534.8

Н. В. Поликарпова*
кандидат физико-математических наук, доцент
М. В. Марунин*
аспирант
*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

НЕВЗАИМНОЕ ОТРАЖЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН ОТ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ В КРИСТАЛЛЕ ПАРАТЕЛЛУРИТА

Одно из наиболее востребованных применений акустооптики связано с проектированием новых устройств для управления оптическими лучами с помощью ультразвука. Рабочие параметры акустооптических устройств определяются геометрией упругих волн, распространяющихся в кристаллах. Многочисленные приложения используют уникальные геометрические и физические свойства ультразвуковых волн в кристалле параттеллурита. Последний обладает чрезвычайно сильной анизотропией упругих свойств и крайне низкой скоростью звука вдоль отдельных направлений. Исследования сосредоточены на конфигурациях упругих волн с обратным отражением, при котором необходимая акустическая волна индуцируется в обратном направлении в результате сложения двух волн. Показано, что при обратном отражении возбуждается дополнительная волна, которая может быть исключена правильным сочетанием фаз двух исходных мод. Исследованы все характеристики волн, включая их направления, поляризацию и углы сноса, а также рассчитаны коэффициенты отражения. Доказано, что, хотя геометрия отражения при невзаимном отражении несимметрична, для потоков энергии выполняется условие взаимности, что позволяет создать устройство со сложением акустических пучков.

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, анизотропия упругих свойств, параттеллурит.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-12-00057.

N. V. Polikarpova*
PhD, Phys.-Math., Associate Professor
M. V. Marunin*
PhD Student
*M. V. Lomonosov Moscow State University

NONRECIPROCAL REFLECTION OF ELASTIC WAVES FROM A FREE BOUNDARY IN A PARATELLURITE CRYSTAL

One of the most popular applications of acousto-optics is related with the design of new devices for controlling optical beams using ultrasound. The operating parameters of acousto-optic devices are determined by the geometry of elastic waves propagating in crystals. Numerous applications exploit the unique geometric and physical properties of ultrasonic waves in a paratellurite crystal. The latter has an extremely strong anisotropy of elastic properties and an extremely low speed of sound along certain directions. Research is focused on back-reflection elastic wave configurations, in which the desired acoustic wave is induced in the opposite direction as a result of the addition of two waves. It is shown that an additional wave is excited upon back reflection, which can be eliminated by a correct combination of the phases of the two initial modes. All characteristics of the waves, including their directions, polarization and drift angles, have been studied, and the reflection coefficients have

also been calculated. It has been proved that although the reflection geometry in nonreciprocal reflection is asymmetric, the reciprocity condition is satisfied for the energy fluxes, which makes it possible to create a device with the addition of acoustic beams.
Keywords: acousto-optic interaction, anisotropy, paratellurite.

Введение

Акустооптика исследует явление взаимодействия световых лучей с дифракционными решетками, индуцированными акустическими возмущениями. Наиболее востребованное практическое приложение акустооптики – создание новых устройств, позволяющих управлять световыми потоками с помощью ультразвука в среде [1–3]. Такие устройства дают возможность управлять направлением, интенсивностью и поляризацией электромагнитной волны.

Основные закономерности акустооптического взаимодействия обусловлены структурой акустического пучка, которая в свою очередь определяется степенью анизотропии используемого материала. В акустооптике используются материалы, обладающие физическими свойствами, отличными от традиционных материалов. Поэтому актуальным направлением исследований стало изучение характеристик акустических волн, распространяющихся в таких средах. Отличительная особенность материалов, используемых в акустооптике, состоит в сильной анизотропии упругих свойств, вследствие чего в кристаллах могут происходить необычные физические процессы и явления, не наблюдающиеся в изотропных и слабо анизотропных средах [1–3].

Акустическая анизотропия материала проявляется в сильной зависимости фазовой скорости волн от направления распространения в кристалле, а также приводит к отклонению направления распространения упругой энергии от направления распространения акустического волнового фронта. Известно, что направление групповой скорости волн в анизотропных средах в общем случае не совпадает с соответствующим направлением фазовой скорости [1–3]. В плоскости XY кристалла парателлурита (TeO_2) угол сноса между акустической групповой и фазовой скоростью достигает рекордной величины $\psi = 74°$ [1–3]. Это значение угла акустического сноса является максимальным для всех известных материалов, используемых в настоящее время в науке и технике при комнатных температурах. Оказалось, что не только распространение, но и отражение упругих волн в анизотропных средах представляет большой интерес. Анализ отражения делает возможным существование ряда новых эффектов, которые нельзя наблюдать в изотропных материалах [1–3]. Известно, что ориентацию отраженных волн в анизотропной среде в зависимости от направления сложно предсказать, не выполнив точный расчет. Это приводит к тому, что направления отраженных волн, возникающих при возбуждении волн в обратном направлении, не совпадают с волнами, генерируемыми в прямом направлении.

Целесообразно рассмотреть, каким образом ведет себя волна на границе раздела двух изотропных сред (рис. 1, *а*). Известно, что в изотропной среде скорость акустической волны не зависит от направления распространения, поэтому поверхность обратных скоростей представляет собой окружность. Волновой век-

тор $\overline{k_1}$ исходной волны составляет угол падения θ_1 с нормалью к границе (рис. 1, *а*). Для того чтобы найти возможные отраженные и преломленные волны, необходимо выполнить условие равенства тангенциальных составляющих падающей, отраженной и преломленной волн. Можно обозначить проекцию волнового вектора $\overline{k_1}$ падающей волны как АО. Для нахождения отраженных и преломленных волн необходимо отложить вдоль границы отрезок $OB = AO$ и восстановить нормаль к границе до пересечения с поверхностями обратных скоростей. Полученные в результате построения волновые векторы $\overline{k_2}$ и $\overline{k_3}$ задают направления для одной отраженной и одной преломленной волн соответственно. В силу того, что поверхность обратных скоростей представляет собой окружность, угол падения равен углу отражения, поэтому $\theta_1 = \theta_2$.

Следующим шагом является возбуждение волны, с волновым вектором, равным по абсолютной величине вектору $\overline{k_2}$ и имеющим противоположное направление, т. е. направленной навстречу отраженной волне. Угол падения в этом случае выбирается равным углу отражения θ_2. В результате прохождения волной границы формируется картина, изображенная на рис. 1, *б*. Можно видеть, что в случае возбуждения волны в обратном направлении угол отражения (рис. 1, *б*) равен углу падения волны θ_1, под которым возбуждалась волна первоначально (рис. 1, *а*).

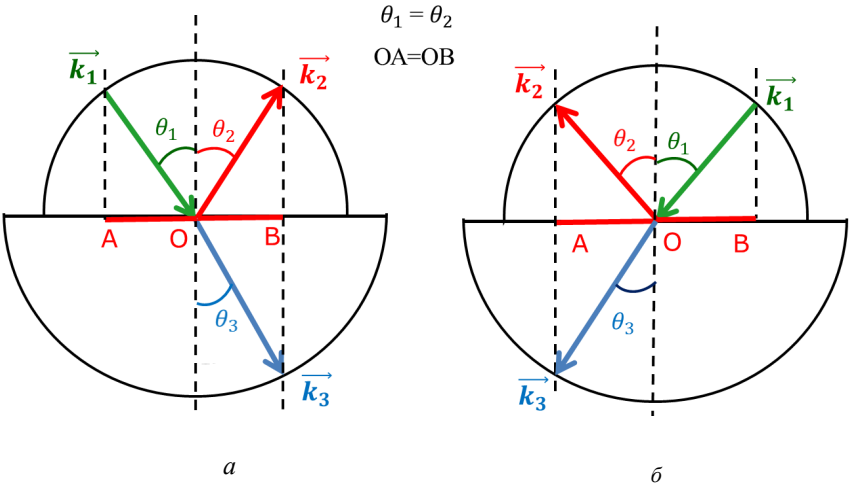


Рис. 1. Отражение и преломление упругих волн на границе раздела двух изотропных сред: а – прямое прохождение волною границы; б – обратное прохождение волною границы

Рисунок 1 демонстрирует полную симметрию поведения волн при распространении в прямом и обратном направлениях. То есть не важно, в каком

направлении возбуждается акустическая волна в рассматриваемом случае, поскольку амплитуды отраженных и преломленных волн, а также углы падения и преломления не изменяются. Это позволяет говорить о взаимном отражении и преломлении волн в изотропной среде.

Иначе происходит отражение волн в анизотропных средах. Для анализа был выбран кристалл парателлурита, как наиболее часто использующийся в акустооптических устройствах. Как было показано ранее, этот материал обладает рекордно высокой анизотропией упругих свойств, не наблюдающейся в других монокристаллах. Берется плоскость XY, поскольку она является самой анизотропной и в ней все явления ярче выражены. Рассмотрение случаев возбуждения волн в обратном направлении показывает, что не наблюдается взаимное отражение, как в изотропных материалах, в то время как энергия симметрично распределяется для различных случаев углов падения и наклона границы относительно кристаллофизических осей.

Таким образом, описанный случай отражения показал, что, в отличие от изотропной среды, в анизотропном материале направления отраженных волн лишь частично совпадают с первоначальной картиной, что говорит о невзаимности акустического отражения в анизотропной среде. С другой стороны, симметрия наблюдается для коэффициентов отражения упругих волн. Подобное невзаимное отражение может быть использовано для создания устройства на основе двух преобразователей (рис. 2), возбуждающих одну моду посредством разных геометрий отражения.

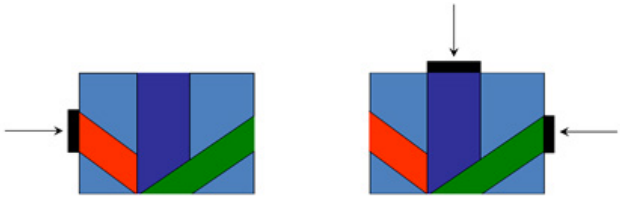


Рис. 2. Устройство на основе двух преобразователей, возбуждающих одну моду посредством разных геометрий

Библиографический список

1. Voloshinov V. B., Polikarpova N. V. Application of Acousto-Optic Interactions in Anisotropic Media for Control of Light Radiation // Acustica-Acta Acustica. 2003. Vol. 89. P. 930–935.

2. Волошинов В. Б., Поликарпова Н. В., Можаев В. Г. Близкое к обратному отражение объемных акустических волн при скользящем падении в кристалле парателлурита // Акустический журнал. 2006. Т. 52, № 3. С. 1–9.

3. Polikarpova N. V., Voloshinov V. B., Ivanova P. A. Nonreciprocal Reflection of Elastic Waves at Free Crystal Boundary // IEEE Xplore Digital Library, 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2019. P. 1–4.

УДК 621.372.63

А. С. Сарпова*
младший научный сотрудник
И. В. Веремеев**
старший научный сотрудник
*Омский научно-исследовательский институт приборостроения
**Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)

ТЕХНОЛОГИИ КОРПУСИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ ПАВ- И ОАВ-УСТРОЙСТВ НА УРОВНЕ ПОДЛОЖКИ

Приведен обзор современных технологий корпусирования кристаллов ПАВ- и ОАВ-устройств на уровне подложки (WLP). Рассмотрены особенности технологических процессов для различных методов WLP, их недостатки и область применения. WLP является одной из ключевых технологий для создания сверхминиатюрных ПАВ- и ОАВ-устройств, широко применяемых в телекоммуникационной аппаратуре.
Ключевые слова: ПАВ, ОАВ, корпусирование на уровне подложки.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер государственной регистрации проекта 121121700062-3).

A. S. Sarpova*
Junior Research Employee
I. V. Veremeev**
Senior Research Employee
*Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering
**Omsk Scientific Center Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

TECHNOLOGIES OF WAFER LEVEL PACKAGING SAW AND BAW DEVICES

This paper provides an overview of modern technologies for wafer level packaging (WLP) for SAW and BAW devices. The features of typical packaging processes for various methods of WLP, their advantages, disadvantages and application are considered. WLP is the key technologies for creating miniature SAW and BAW devices used in telecommunications equipment.
Keywords: SAW, BAW, packaging, WLP.

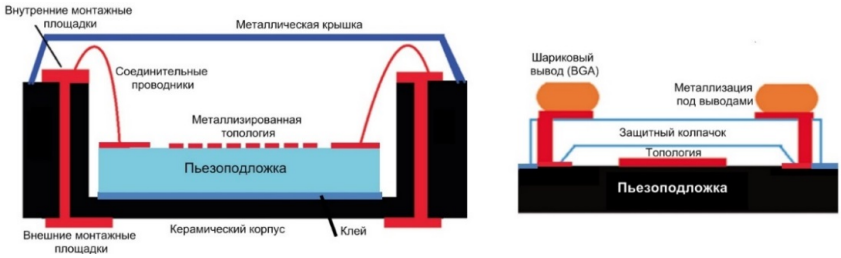
Особенности упаковки кристаллов ПАВ-устройств

Устройства на основе поверхностных акустических волн (ПАВ), такие как фильтры, резонаторы и генераторы, широко применяются в системах телекоммуникации и беспроводной связи. Характеристики ПАВ-устройств в многом определяются состоянием поверхности его кристалла. Внешние воздействующие факторы (ВВФ) оказывают влияние на качество поверхности кристалла и, соответственно, на стабильность параметров ПАВ-устройств, как в процессе монтажа компонента на плату, так и в процессе эксплуатации изделия,

поэтому очень важно защитить поверхность кристалла для увеличения его надежности и срока службы.

С развитием мобильной связи и смарт-устройств постоянно возрастают требования аппаратуры к уменьшению объема, занимаемого на плате компонентом под поверхностный монтаж (SMD) [1]. ПАВ-устройства, упакованные по традиционной технологии методом проволочного монтажа в SMD-корпусах, изготовленных на основе высокотемпературной и низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (HTCC и LTCC), обладают высокой надежностью, но их возможности миниатюризации ограничены (рис. 1, *а*). Это неизбежно привело к поиску новых методов упаковки кристаллов.

Дальнейшим развитием методов корпусирования стал метод упаковки по размеру кристалла (CSP). В настоящее время существуют два основных подхода к CSP-упаковке: FC-CSP – упаковка по размеру кристалла методом перевернутого кристалла (Flip-Chip) и WL-CSP (или WLP) – упаковка по размеру кристалла на уровне пластины. Метод FC-CSP впервые представлен компанией IBM более 40 лет назад и в настоящее время широко используется производителями микросхем. Размер типичного устройства в корпусе FC-CSP на 50–100% больше, чем первоначальный размер кристалла, что является значительным улучшением по сравнению с традиционными методами упаковки в LTCC или HTCC-корпуса. С другой стороны, WLP – это относительно новая перспективная технология, которая позволяет максимально уменьшить размер упаковки, приблизив его к размеру кристалла (рис. 1, *б*), а также существенно снизить себестоимость упаковки по сравнению с другими методами.



а *б*

Рис. 1. Упаковка кристалла в HTCC-корпус (а) и методом WLP (б)

Несмотря на то что технологии корпусирования CSP и WLP широко используются для упаковки микросхем, только недавно их начали применять для упаковки кристаллов ПАВ. Особенность ПАВ-устройств – возбуждение металлизированной топологией и распространение акустических волн в приповерхностном слое пьезоэлектрической подложки. Появление над рабочей поверхностью дополнительных слоев материалов изменяет условия распространения ПАВ и приводит к существенному ухудшению электрических характеристик

изделия. Поэтому широко применяемый для микросхем метод бескорпусной герметизации – заливки компаундом – не подходит для упаковки ПАВ-устройств. Исключением являются фильтры на упругих граничных волнах (УГН), однако достигаемая данным классом фильтров совокупность электрических характеристик несколько хуже [2] и ограничивает их коммерческое применение.

Основные задачи при упаковке кристаллов: обеспечение устойчивости изделия к ВВФ; уменьшение влияния упаковки на электрические параметры изделия; снижение габаритов упаковки, снижение стоимости упаковки. Главная особенность упаковки именно ПАВ-устройств – необходимость создания герметичной полости, заполненной воздушной или инертной газовой средой, над топологией кристалла. Создание такой герметичной полости усложняет стандартные процессы корпусирования и является одной важнейших задач при упаковке ПАВ-кристаллов.

WLP-технология

Существует большое количество подходов к упаковке как методами FC-CSP, так и WL-CSP (WLP). Главное различие между технологиями – стадия герметизации кристалла: в методах FC-CSP, как и при использовании HTCC и LTCC-корпусов, защита кристалла производится на поздних этапах изготовления после разделения кристаллов и монтажа, а в методах WLP герметизация кристаллов проходит на ранних этапах упаковки групповым способом на неразрезанной подложке (рис. 2).

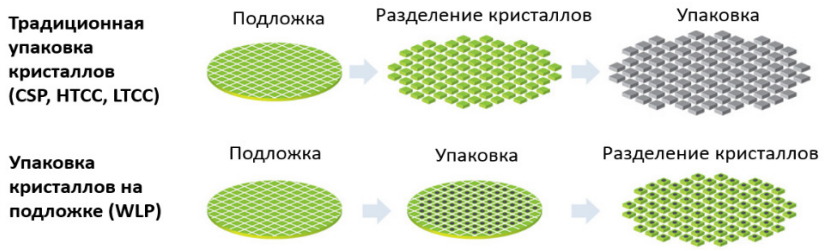


Рис. 2. Сравнение методов индивидуальной (CSP, HTCC, LTCC) и групповой (WLP) упаковки кристаллов

Существует несколько различных методов WLP: присоединение защитной полупроводниковой подложки (wafer-to-wafer) с полостями над топологией и отверстиями для проводников [3]; формирование полости с помощью защитных жертвенных слоев, которые удаляются на поздних этапах герметизации [4]; 3D-структурирование полимерных структур с помощью фоторезистов над топологией кристалла.

Среди указанных способов наилучшим по соотношению качества и затрат на упаковку обладают методы 3D-структурирования на основе жидких и пленочных органических фоторезистов, например SU-8 и SUEX (рис. 3) [5–8]. При

упаковке WLP методом 3D-структурирования формирование защитных структур и выводов происходит наращиванием «снизу вверх» и состоит из четырех основных этапов: 1) формирование защитного колпачка; 2) формирование выступов металлизации под выводы; 3) нанесение паяльной пасты и формирования шариковых выводов BGA; 4) резка упакованных модулей. При необходимости увеличения механической прочности свода колпачка он может быть усилен с помощью термической постобработки фоторезиста [7] или дополнительным слоем металлизации [8]. Стадия формирования выступов металлизации под выводы может выполняться как методом химического послойного наращивания «снизу вверх» (рис. 3) [5], так и более сложными методами с использованием коммутационных слоев и переходных отверстий (рис. 4, *в*) [6].

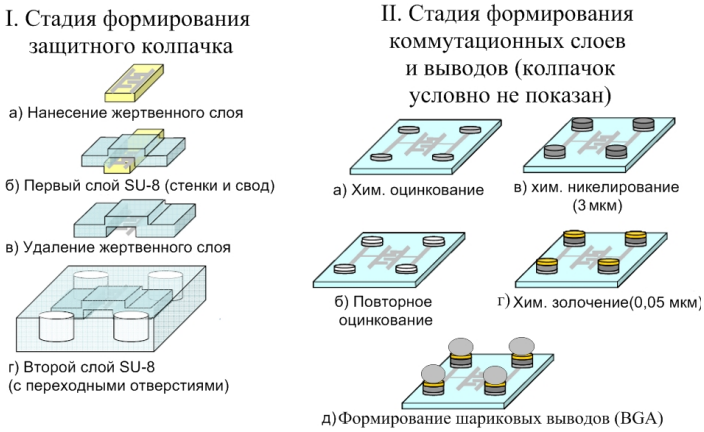


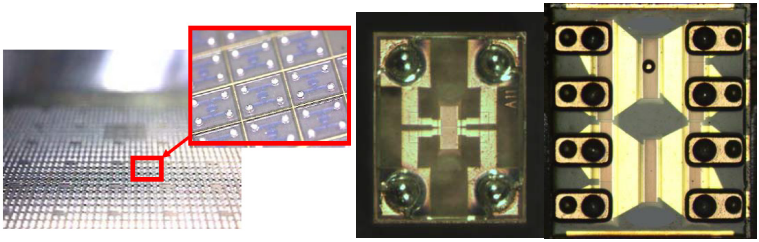
Рис. 3. Технология WLP-упаковки кристаллов методом 3D-структурирования

На финальных этапах на сформированный подслой металлизации наносится паяльная паста и формируются BGA-выводы. После этого подложка с упакованными кристаллами разрезается (рис. 4). Технология WLP обеспечивает минимальный размер упаковки 0,9×0,7×0,5 мм и существенно меньшие затраты при производстве за счет группового процесса герметизации кристаллов. Преимущества WLP позволили значительно потеснить другие технологии для упаковки отдельных ПАВ- и ОАВ-кристаллов.

Заключение

Достигнутый WLP-технологией уровень миниатюризации и низкая стоимость обеспечивают широкое применение в современной гражданской мобильной аппаратуре связи, телекоммуникации и смарт-устройствах, оставляя конкурентов далеко позади. WLP-компоненты также могут использоваться для создания сверхминиатюрных устройств военного и специального назначения. При этом упаковка отдельных кристаллов в HTCC-корпуса еще используется

для телекоммуникационной стационарной или мобильной аппаратуры специального, военного или инфраструктурного применения, где надежность изделия важнее, чем стоимость и габариты.



а) *б)* *в)*

Рис. 4. Упакованные по технологии WLP платы перед резкой (а); ПАВ-фильтр в WLP-упаковке габаритами 1,0×0,8×0,45 мм, изготовленный методом «наращивания» (б); ПАВ-фильтр в WLP-упаковке габаритами 1,1×0,9×0,36 мм, изготовленный с использованием коммутационных слоев и переходных отверстий (в)

Библиографический список

1. Schmidhammer E., Metzger T., Hoffmann C. Multiplexers: A necessary extension for 4G/5G systems // IEEE MTT-S International microwave Symposium. 2016. P. 2–5.
2. Bhattacharjee K., Shvetsov A., Zhgoon S. Cavityless Wafer Level Packaging of SAW Devices // Proceeding of the IEEE Ultrasonics Symposium. 2007. P. 1886–1889.
3. Lim J.-H., Hwang J.-S., Kwon J., Ham S.-J. An Ultra Small SAW RF Filter UsingWafer Level Packaging Technology // Proceeding of the IEEE Ultrasonics Symposium. 2006. P. 196–199.
4. Wilkins B. Wafer Level Packaging of SAWs Enables Low Cost 2.5G and 3G Radio Modules // Proceeding Third Int. Symp. on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems. 2007. P. 179–184.
5. Shiba F., Yamazaki M., Iijima O., Yatsuda H. GPS SAW Filter Using a Wafer level Technique // Proceeding of the IEEE Ultrasonics Symposium. 2007. P. 937–940.
6. Fukano T., Okubo Y., Nishii J., Obara I. 2E-2 0806 SAW Filters using Wafer Level Packaging Technology // Proceeding of the IEEE Ultrasonics Symposium. 2007. P. 68–71.
7. Fukano T., Okubo Y., Nishii J., Obata I. Wafer Level Packaged SAW Filters with Resistance to Transfer Molding // Proceeding of the IEEE Ultrasonics Symposium. 2008. P. 108–111.
8. Sakinada K., Moriya A., Kitajima M., Kawachi O. A study of Wafer Level Packaging of SAW Filter for Module Solution // Proceeding of the IEEE Ultrasonics Symposium. 2009. P. 2692–2695.

УДК 535.016

И. Ш. Хасанов*
кандидат физико-математических наук
Д. В. Чуриков*
кандидат физико-математических наук
О. Д. Вольпян*
научный сотрудник
К. В. Алыбин*
инженер
Р. В. Дронский*
инженер
*Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ТОНКИХ ГРАДИЕНТНЫХ ПЛЕНОК АППРОКСИМАЦИЕЙ В ВИДЕ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОСКОПИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА НА ОСНОВЕ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ФИЛЬТРА

Рассмотрен метод восстановления приближенного вида оптического профиля тонких градиентных пленок с помощью их аппроксимации полиномиальными функциями. Предлагаемый подход основан на спектральных и угловых измерениях отраженного квазимонохроматического *p*-поляризованного света после фильтрации акустооптическим перестраиваемым фильтром. Измерения выполняются методом поверхностного плазмонного резонанса для тонкой золотой пленки с градиентным по показателю преломления диэлектрическим покрытием на призме в геометрии Кречманна. Установленная дисперсия резонансного угла по длине волны позволяет подобрать вид оптического профиля с помощью набора функций, представляющих собой полиномиальную последовательность. Для выбора вида полинома, приближенного к истинному оптическому профилю, предлагается провести дополнительное измерение при контакте поверхности тонкой пленки с нереактивной жидкостью. Этот метод оптической характеризации тонких градиентных пленок имеет потенциальное применение как наиболее высокочувствительный оптический метод для неразрушающего контроля тонких пленок, в том числе в реальном времени при их производстве.
Ключевые слова: поверхностный плазмонный резонанс, акустооптика, градиентные пленки, спектроскопия, полиномиальная аппроксимация.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания. Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН (НТЦ УП РАН) [https://ckp.ntcup.ru].

I. S. Khasanov*
PhD, Phys.-Math.
D. V. Churikov*
PhD, Phys.-Math.
O. D. Volpyan*
Research Employee

K. V. Alybin*
Engineer
R. V. Dronskii*
Engineer
*Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation
of the Russian Academy of Sciences

OPTICAL PROFILE RECONSTRUCTION OF THIN GRADIENT FILMS BY POLYNOMIAL APPROXIMATION USING SURFACE PLASMON RESONANCE SPECTROSCOPY BASED ON AN ACOUSTO-OPTICAL TUNABLE FILTER

The method to reconstruct an approximate form of the optical profile of thin gradient films using their approximation by polynomial functions is presented. The proposed approach is based on experimental spectral and angular measurements of reflected quasimonochromatic *p*-polarized light after filtering by an acoustooptic tunable filter. Measurements are made by surface plasmon resonance for a thin gold film with a refractive index gradient dielectric coating on a prism in Kretschmann geometry. The established wavelength dispersion of the resonance angle makes it possible to select the type of optical profile using a set of functions representing a polynomial sequence. To select the type of polynomial approximating the true optical profile, it is proposed to perform an additional measurement when the surface of the thin film is in contact with a non-reactive liquid. The proposed optical characterization method of thin gradient films has potential application as the most highly sensitive optical method for nondestructive control of thin films, including real-time production of thin films.
Keywords: surface plasmon resonance, acoustooptics, gradient films, spectroscopy, polynomial approximation.

Введение

Тонкие диэлектрические пленки с градиентным по глубине слоя показателем преломления являются примером метаматериалов для создания новых устройств фотоники [1]. Изменяя показатель преломления пленки, можно создавать сложные оптические структуры для управления светом. Например, градиентные пленки можно использовать для создания плоских плазмонных линз. Градиентные покрытия могут повысить лучевую стойкость зеркал [2] или улучшить оптические характеристики многослойных оптических структур, например коэффициент отражения брэгговских отражателей [3] и т. д. Однако создание таких пленок предъявляет высокие требования к прецизионному контролю при производстве.

Чувствительность существующих спектрофотометрических методов, которые используются для неразрушающего контроля, не позволяет различать плавные изменения оптических констант в тонких диэлектрических покрытиях с разрешением в несколько нанометров по толщине [4]. Метод поверхностного плазмонного резонанса (ППР) является наиболее чувствительным оптическим методом для характеризации пленок субволновой толщины. Спектроскопия ППР на 2 порядка более чувствительный метод для оптической характеризации тонких пленок [5]. Явление ППР позволяет концентрировать энергию электромагнитного поля на субволновых расстояниях ($d \ll \lambda$) вблизи проводящей поверхности, что существенно повышает эффективность взаимодействия света с

веществом. Наиболее известные методы наблюдения ППР – схемы призменного ввода в геометрии Кречмана [6; 7]. На эксперименте это проявляется как резкое падение интенсивности отраженного *p*-поляризованного света, падающего на основание призмы под углом, превышающим угол полного внутреннего отражения. Физическая причина этого состоит в переходе энергии объемной волны в возбуждение поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) на границе раздела на границе раздела «металл–диэлектрик». Напряженность поля ПЭВ экспоненциально возрастает при приближении к поверхности, что и обусловливает высокую чувствительность метода. Глубина проникновения поля ПЭВ нелинейно зависит от длины волны, что позволяет извлекать дополнительную полезную информацию из резонансных кривых, измеренных на разных длинах волн. Поэтому спектроскопия ППР, в частности, позволяет характеризовать тонкие градиентные по показателю преломления диэлектрические пленки, используя в качестве модели приближение множеством однородных слоев с небольшим различием в показателе преломления [8; 9].

Метод поверхностного плазмонного резонанса

Коэффициент отражения $R(\theta,\lambda)$ от границы раздела «металл–диэлектрик» в случае поверхностного резонанса может быть описан с помощью уравнений Френеля. Хотя для пленок с градиентным коэффициентом преломления эти уравнения могут быть записаны аналитически, найти решение обратной задачи для восстановления произвольного оптического профиля тонкой градиентной пленки не представляется возможным. Более общим подходом служит численная аппроксимация градиентной пленки дискретной многослойной моделью. Для расчета формы резонансной кривой $R(\theta,\lambda)$ многослойной структуры (для численных расчетов выбрано число слоев $N = 100$) мы используем вывод, основанный на методе матриц переноса [10]. Аналитическая форма уравнения для коэффициента отражения $R(\theta,\lambda)$ чрезвычайно громоздка для прямого математического анализа из-за нелинейного характера взаимодействия между слоями. Чтобы найти показатели преломления n_i каждого слоя, используем метод Пауэлла [11]. Основной проблемой при минимизации многомерных функций является большее число переменных, что затрудняет и затягивает поиск решения. Для сокращения числа переменных мы принимаем модель для описания оптического профиля $n_0 \dots n_N$ как полиномиальную функцию *n(x)*.

Экспериментальная установка

Для демонстрации работы метода спектроскопии ППР в НТЦ УП РАН была собрана экспериментальная установка. В качестве спектрально-селективного элемента был использован акустооптический перестраиваемый фильтр (АОПФ) производства НТЦ УП РАН. Основные параметры АО-ячейки описаны в [12] (материал парателлурит TeO2, γ = 7°, режим дифракции e → o, длина кристалла 25 мм, световая апертура 10×8 мм, спектральный диапазон 450–900 и 900–1700 нм). Хроматический сдвиг ячейки АО компенсируется

клином из стекла марки ТФ-1. Оптическая схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

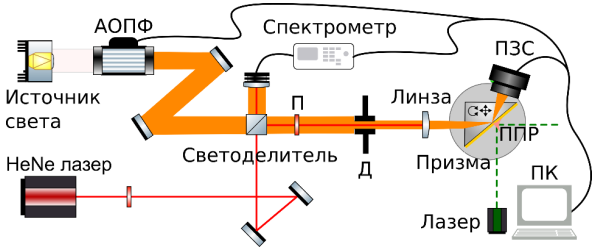


Рис. 1. Оптическая схема спектроскопии на основе АОПФ: источник света — высокомощная система для генерации суперконтинуума LEUKOS Rock 400 2; He-Ne лазер – гелий-неоновый лазер ЛГН-207а с длиной волны излучения 632,8 нм; СД – светоделитель, неполяризующийся куб 50/50 с размером граней 25 мм; Д – диафрагма с апертурой 8 мм для коллимации пучка; линза – ахроматическая линза Thorlabs Ø25,4 с фокусным расстоянием 50 мм; П – поляризатор видимого диапазона; спектрометр с перестраиваемой решеткой Avesta ASP-150; призма – прямоугольная призма (изготовлена в НТЦ УП РАН) с размерами основания 22 мм и высотой 11 мм из стекла ЛК-7 с золотой пленкой и диэлектрическим покрытием, размещенная на вращающейся мини-платформе Standa 7R7; ПЗС – монохромная промышленная камера GigE Imaging Source DMK 23G445 без ИК-фильтра с разрешением 1280×960 пикселей и чувствительностью до 0,015 лк; ПК – персональный компьютер с управляющим программным обеспечением, написанным на Python 3 и AutoIt 3

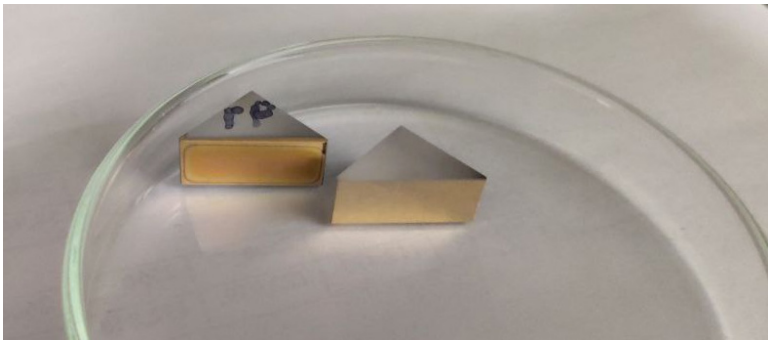
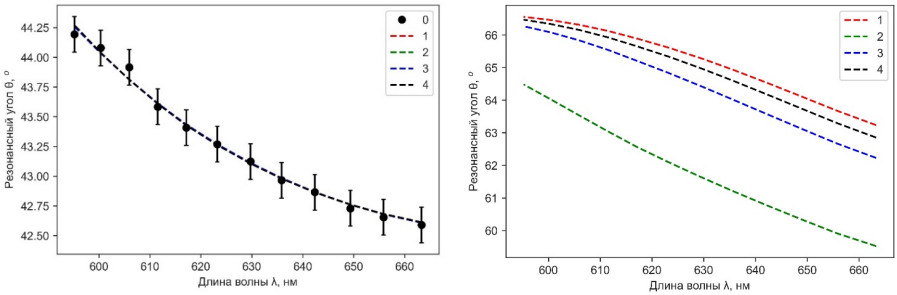


Рис. 2. Фото изготовленных образцов: образец с надписью ГР – исследуемый образец с диэлектрической градиентной пленкой; второй образец – без диэлектрического покрытия

Были изготовлены два образца (рис. 2) с тонкой пленкой золота толщиной 50 нм, напыленного на основнание призмы из стекла марки ЛК-7. Затем на один из образцов дополнительно поверх золота была нанесена градиентая по показателю преломления тонкая пленка толщиной 220 нм методом магнетронного напыления [13; 14]. Исходный код примеров доступен по адресу: https://github.com/KhasanovISh/Public/tree/main/2023%20WECONF.



а *б*

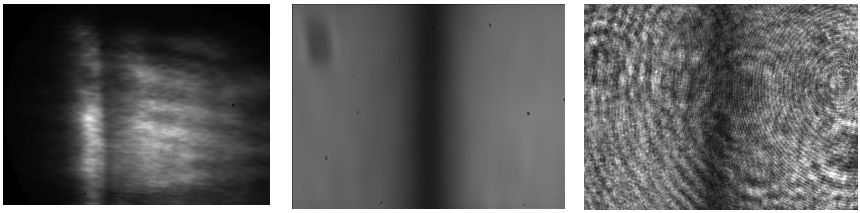
Рис. 3. Резонансные кривые: а – 0, эксперимент (золотая пленка толщиной 55 нм + градиентная пленка 220 нм), аппроксимации полиномами вида: 1: 1,655, 2: –0,494x + 1,890, 3: –0,167x^2 +1,705, 4: –0,072x^3 + 1,67035575; б – моделирование резонансных кривых, полученных при спектральных измерениях в случае контакта тонкой пленки с этанолом

На рис. 3, *а* представлены экспериментальные измерения, которые аппроксимированы различными полиномиальными функциями: константной – A, линейной – A·x + B, квадратичной – A·x^2 + B, кубической — A·x^3 + B, где безразмерная величина $x = z/d$ изменяется от 0 до 1, z – глубина слоя в нм, d – толщина слоя (220 нм), 0 соответствует границе «металл–диэлектрик». Значения A и B приведены в подписи к рис. 3.

Из рис. 3 видно, что каждая полиномиальная функция хорошо описывает набор экспериментальных данных. Известно, что у исследуемой градиентной пленки оптический профиль должен быть линейным, и полученные значения соответствуют ожидаемым значениям показателя преломления. Однако в случае если вид оптического профиля заранее неизвестен, для выбора приближения, наиболее близкого к истинному, необходимо провести дополнительное измерение по схеме на рис. 1, изменив внешнюю среду с воздуха на жидкость (т. е. с большим показателем преломления). Это легко можно сделать, например, капнув каплю спирта на поверхность пленки. Спирт не реагирует с веществом тонкой пленки и быстро бесследно испаряется через некоторое время после проведения измерений. Такое дополнительное неразрушающее пленку измерение позволит различить модели оптических профилей как видно из рис. 3, *б*.

Дискуссия

Проведенные экспериментальные измерения отличаются достаточно высокой погрешностью по сравнению с другими оптическими метода измерений тонких пленок [15]. Это вызвано тем, что был использован когеретный источник света.



а *б* *в*

Рис. 4. Пример изображения на монохроматической камере углового спектра поверхностного плазмонного резонанса (узкая темная полоса — резонансная линия) в отраженном излучении на центральной длине волны акустооптического фильтра: а – λ = 642 нм в излучении суперконтиинуума для призмы с золотым напылением 50 нм и градиентной плёнокой 220 нм; б – λ = 633 нм в излучении плазменного источника для призмы с серебряным напылением 55 нм; в – λ = 632,8 нм в излучении гелий-неонового лазера для призмы с серебряным напылением 55 нм

Продемонстрируем это с помощью примеров экспериментальных изображений, полученных в схожем эксперименте. Камера регистрирует с помощью фокусирующей линзы угловой спектр отраженного света, длину волны которого можно изменять с помощью АОПФ. На рис. 4, *а* приведен пример подобных измерений. Изображение содержит много шума, вызванного спеклами – случайной интерференцией. Для справки приведены примеры двух других изображений резонансных линий (рис. 4, *б* и 4, *в*), полученные с помощью иных источников света. Наименее шумным является плазменный источник (рис. 4, *б*), это связано с тем, что его свет некогерентный, в отличие от слабокогерентного суперконтинуума (длина когерентности порядка 3–4λ) и когерентного лазера. Поэтому в экспериментах по спектроскопии ППР необходимо использовать некогерентный источник, чтобы добиться высокой точности и чувствительности.

После проведенных измерений методом спектроскопии ППР мы обнаружили, что любая выбранная полиномиальная функция хорошо аппроксимирует экспериментальные данные. Для того чтобы убедиться, что выбранная модель верна, нам необходимо провести дополнительные измерения при измененных параметрах оптической структуры (призма – пленки – внешняя среда). В методе ППР в геометрии Отто это возможно, например, путем изменения размера воздушного зазора между металлом и диэлектриком. В схеме Кречманна единственный параметр, который можно изменить, – внешняя среда. Мы можем изменить показатель преломления внешней среды, например, с помощью капли жидкости на место на поверхности пленки (фокальное пятно), где производится измерение. Но для того, чтобы метод оставался неразрушающим: 1) необходимо подбирать жидкость так, чтобы она химически не реагировала с пленкой; 2) могла быть легко удалена с поверхности, например, испарением; 3) не испарялась полностью в течение измерений.

Заключение

Проведено измерение оптического профиля с помощью спектроскопии поверхностного плазмонного резонанса на основе акустооптического фильтра. Использование АОПФ совместно с некогерентным источником позволяет значительно повысить чувствительность измерений. В качестве модели оптического профиля пленки были выбраны полиномиальные функции. Установлено, что для нахождения истинного оптического профиля необходимы дополнительные измерения с иным показателем преломления внешнего по отношению к тонкой пленке слоя. Изучение распространения поверхностных электромагнитных волн в тонких градиентных пленках – современное направление фундаментальных исследований и перспективно для создания новых устройств фотоники и оптоэлектроники [16].

Библиографический список

1. Shvartsburg A. B., Maradudin A. A. Waves in gradient metamaterials. Singapore: World Scientific, 2013. 328 p.

2. Lowdermilk W. H., Milam D. Graded-index antireflection surfaces for high-power laser applications // Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics. 1980. Vol. 36, № 11. P. 891–893.

3. Mizunami T., Djambova T. V., Niiho T., Gupta S. Bragg gratings in multimode and few-mode optical fibers // Journal of Lightwave Technology. 2000. Vol. 18, № 2. P. 230–235.

4. Stenzel O. The Physics of Thin Film Optical Spectra: An Introduction. 2nd ed. Switzerland, Cham: Springer International Publishing, 2016. 352 p.

5. Хасанов И. Ш. Диагностика тонких градиентных диэлектрических покрытий с помощью микроскопии поверхностного плазмонного резонанса и метода фантомных изображений // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022. № 11. С. 29–38.

6. Майер С. А. Плазмоника. Теория и приложения. М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2011. 278 с.

7. Климов В. В. Наноплазмоника. 2-е изд. М.: Физматлит, 2010. 480 с.

8. Анисимов А. В., Хасанов И. Ш. Определение профиля комплексного показателя преломления тонкого градиентного слоя методом поверхностного плазмонного резонанса // Технические средства систем управления и связи. Астрахань, 2022. С. 29–32.

9. Хасанов И. Ш., Анисимов А. В., Лобастов С. А. Оптическая характеризация диффузионных переходных слоев в тонких пленках с помощью спектроскопии поверхностного плазмонного резонанса на основе акустооптического перестраиваемого фильтра // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. СПб., 2022. С. 141–145.

10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.

11. Powell M. J. D. The BOBYQA algorithm for bound constrained optimization without derivatives.

12. Batshev V. I., Machikhin A. S., Kozlov A. B., Boritko S. V. Tunable Acousto-Optic Filter for the 450–900 and 900–1700 nm Spectral Range // J. Commun. Technol. Electron. 2020. Vol. 65, № 7. P. 800–805.

13. Abramov N. F., Volpyan O. D., Obod Yu. A., Dronskii R. V. Fabrication of nanogradient coatings for laser devices using the method of magnetron sputtering // Quantum Electron. IOP Publishing, 2013. Vol. 43, № 9. P. 791.

14. Вольпян О. Д., Кузьмичев А. И., Обод Ю. А. Магнетронная технология градиентных оптических покрытий // Физика и химия обработки материалов. 2014. № 3. С. 25–32.

15. Khasanov I. S., Knyazev B. A., Lobastov S. I., Anisimov A. V. Optical Characterization of Thin Films by Surface Plasmon Resonance Spectroscopy Using an Acousto-Optic Tunable Filter: 5 // Materials. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. Vol. 16, № 5. P. 1820.

16. Шварцбург А. Б. Сценарии поверхностных электромагнитных волн: новая волна // Фотоника. 2018. Т. 12, № 5 (73). С. 522–529.

УДК 534.286, 535.3

В. С. Хоркин*
кандидат физико-математических наук, доцент
С. Н. Манцевич*
доктор физико-математических наук, профессор
М. С. Кузнецов**
заведующий лабораторией
К. С. Зараменских**
кандидат химических наук
К. А. Субботин**
кандидат технических наук
*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
**Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет»
***Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КУБИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛА KRS-5

Исследованы акустические свойства кубического кристалла KRS-5, который может быть использован для создания акустооптических приборов, работающих в видимом, ближнем, среднем и длинноволновом инфракрасных диапазонах. В работе представлены как результаты расчетов акустических характеристик кристалла KRS-5, так и данные их измерений. Изучено затухание продольных и сдвиговых акустических волн, распространяющихся вдоль оси симметрии материала. Измерения проводились акустооптическим методом на частоте ультразвука $f = 100$ МГц, при этом величины затухания оказались равными $\alpha_L = 0{,}9 \pm 0{,}1$ см$^{-1}$ и $\alpha_S = 2{,}9 \pm 0{,}1$ см$^{-1}$.

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, KRS-5, акустическое затухание, поверхность обратных скоростей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №19-12-00072.

V. S. Khorkin*
PhD, Phys.-Math., Associate Professor
S. N. Mantsevich*
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor
M. S. Kuznetsov**
Chief of Laboratory
K. S. Zaramenskikh**
PhD, Chem.
K. A. Subbotin**
PhD, Tech.
*M. V. Lomonosov Moscow State University
**State Scientific-Research and Design Institute of Rare-Metal Industry «Giredmet»
***Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

ACOUSTICAL PROPERTIES OF KRS-5 CUBIC CRYSTAL

We investigated acoustical properties of KRS-5 cubic crystal which can be used in acousto-optic devices operating in visible, near, medium and long wave infrared region. We present the results of theoretical analysis and experimental investigation of KRS-5 acoustic properties. In this paper the measurements of longitudinal and shear acoustic wave attenuation are presented. This experiment was carried out applying the acousto-optic method of acoustic attenuation measurement. The experiment was fulfilled for the ultrasound frequency $f = 100$ MHz and the obtained attenuation coefficients are: $\alpha_L = 0{,}9 \pm 0{,}1$ cm^{-1} and $\alpha_S = 2{,}9 \pm 0{,}1$ cm^{-1}.
Keywords: acousto-optic interaction, KRS-5, acoustic attenuation, acoustic slowness surface.

Введение

На сегодняшний день акустооптические (АО) приборы активно используются для управления электромагнитным излучением видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов. Наиболее часто в таких устройствах применяют кристалл диоксида теллура (парателлурита, TeO_2). Однако парателлурит непрозрачен для оптического излучения с длинной волны $\lambda > 5$ мкм, что ограничивает его применение в среднем и длинноволновом ИК-диапазоне. Для управления излучением в указанных диапазонах могут применяться различные материалы на основе германия, теллура, ртути или таллия [1–6]. Однако на данный момент большинство из перечисленных материалов являются малоизученными. В литературе имеются работы по исследованию их фундаментальных свойств или лабораторных прототипов АО-устройств. В частности, в последнее время большое внимание уделяется соединениям на основе ртути, таким как каломель (Hg_2Cl_2), бромид (Hg_2Br_2) и йодид (Hg_2I_2) ртути [2]. На их основе можно создавать как акустооптические устройства, так и пассивные оптические устройства, например поляризационную призму Глана [4].

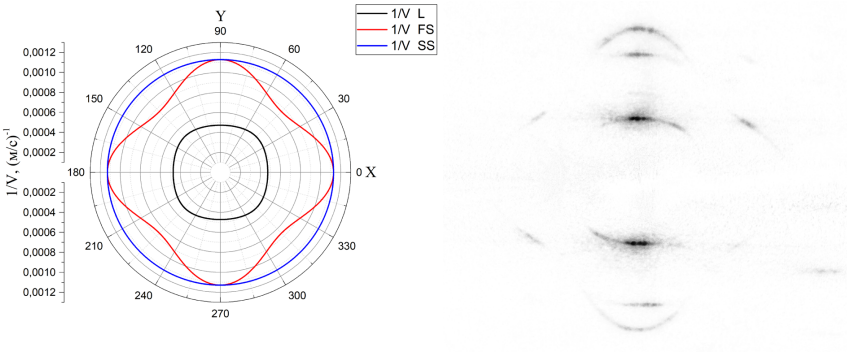
В работе рассматривается возможность применения в качестве основы для АО-приборов кристаллов галогенидов таллия – KRS-5 (TlBr-TlI). Данный материал является кубическим кристаллом, который обладает широким диапазоном прозрачности: от видимого ($\lambda = 0{,}61$ мкм) до дальнего инфракрасного диапазона ($\lambda = 45$ мкм) [1; 5]. Кроме того, данный материал обладает достаточно высоким значением АО-качества, который достигает величины $M_2 = 1200 \cdot 10^{-18}$ с^3·г$^{-1}$ вблизи границы прозрачности в видимом диапазоне.

Представленная работа продолжает цикл исследований фундаментальных свойств кристалла KRS-5 [6]. Она включает данные теоретического анализа акустических свойств кристалла KRS-5 и результаты соответствующих измерений. Получена диаграмма Шефера – Бергмана для кристаллографической плоскости XY. Проведено измерение величин затухания продольных и сдвиговых акустических волн, распространяющихся вдоль оси симметрии кристалла KRS-5.

Результаты и их анализ

Расчет акустических свойств проводился в приближении плоских акустических волн путем решения уравнения Кристоффеля. В качестве исходных данных использовались следующие значения упругих коэффициентов c_{ij}: $c_{11} = 3{,}31 \cdot 10^{10}$ Па, $c_{12} = 1{,}32 \cdot 10^{10}$ Па, $c_{44} = 0{,}579 \cdot 10^{10}$ Па, а также плотности

ρ = 7370 кг/м^3 [5]. Результаты расчета приведены на рис. 1, *а* в виде сечения поверхности акустической медленности кристаллографической плоскостью XY. На рис. 1, *б* показана та же зависимость, но полученная экспериментально, – диаграмма Шефера – Бергмана. На рис. 1, *а* черным цветом представлены параметры продольной акустической волны, а красным и синим – медленности сдвиговых акустических волн.



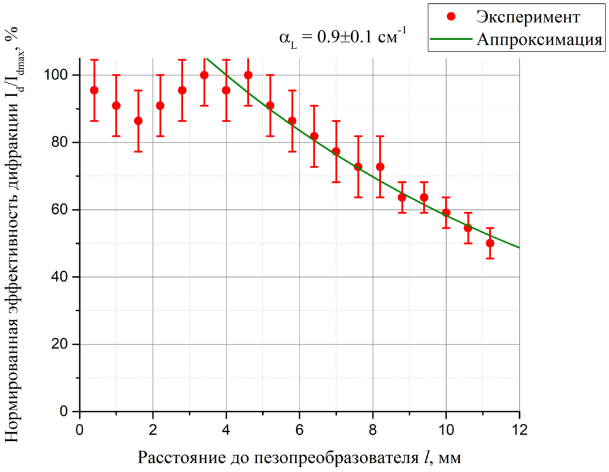
а) *б)*

Рис. 1. Сечение поверхности акустической медленности плоскостью XY (а), диаграмма Шефера – Бергмана, полученная для плоскости XY кристалла KRS-5 (б)

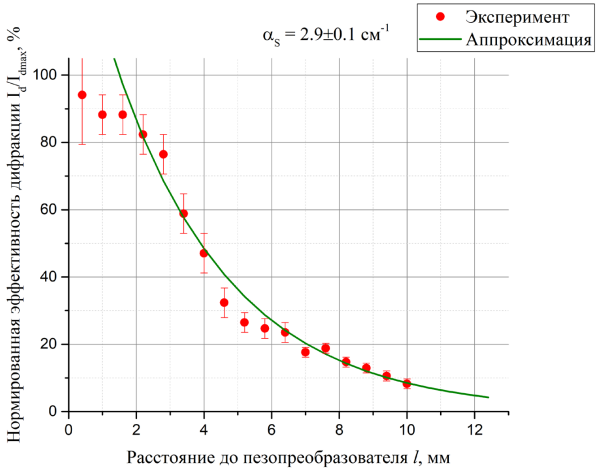
Из представленных зависимостей видно, что в кристалле KRS-5 наблюдаются довольно низкие скорости ультразвуковых волн. Скорость продольной волны V_L = 2100 м/с, тогда как скорость сдвиговых волн V_S = 890 м/с. Экспериментальное исследование проводилось на длине волны He-Ne лазера λ = 0,632 нм, при этом частота ультразвука f = 75 МГц. Теоретические значения скоростей акустических волн были подтверждены экспериментально. На рис. 2, *б* в полутоновом представлении приведена диаграмма Шефера – Бергмана, которая описывает акустические свойства в плоскости XY кристалла KRS-5. В эксперименте эффективная АО-дифракция наблюдалась не для всех направлений ультразвука, что не позволило зарегистрировать поверхности медленности полностью. Яркость линии на рис. 2, *б* зависит от эффективности АО-взаимодействия: чем темнее линия, тем выше эффективность взаимодействия на акустической волне, распространяющейся в плоскости XY. Из рис. 1 видно хорошее качественное сходство полученных теоретических и экспериментальных результатов. Наиболее сильное АО-взаимодействие наблюдалось в эксперименте на продольной и сдвиговой акустических волнах вблизи оси симметрии кристалла.

Также в ходе экспериментального исследования были измерены зависимости нормированной эффективности дифракции от расстояния до возбудителя ультразвука. Результаты измерений приведены на рис. 2, где красным цветом

представлены экспериментальные данные, а зеленым – их теоретическая аппроксимация.



а)



б)

Рис. 2. Зависимости нормированной эффективности дифракции от расстояния до возбудителя ультразвука: а – для продольной акустической волны, б – для сдвиговой акустической волны

Измерения коэффициентов затухания акустических волн были выполнены для фиксированной частоты ультразвука $f = 100$ MHz. Измерения проводились при малой акустической мощности P_a, следовательно, интенсивность дифрагированного света была пропорциональна мощности ультразвука [1]:

$$I_d = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda\cos\theta}\sqrt{\frac{M_2 P_a l}{2d}}\right)\Bigg|_{P_a = P_{a0}\exp(-\alpha L)} \propto I_{d\max}\exp(-\alpha L), \qquad (1)$$

где $I_{d\max}$ – интенсивность дифрагированного излучения вблизи возбудителя ультразвука, I_d – интенсивность дифрагированного излучения на расстоянии L от возбудителя, α – коэффициент затухания ультразвука, M_2 – коэффициент АО-качества материала, P_a – акустическая мощность, l и d – геометрические размеры акустического столба, θ – угол Брэгга.

На основе теоретической зависимости (1) была произведена аппроксимация экспериментальных данных и определены коэффициенты затухания продольных и сдвиговых акустических волн, распространяющихся в кристалле KRS-5: $\alpha_L = 0{,}9 \pm 0{,}1$ см$^{-1}$ и $\alpha_S = 2{,}9 \pm 0{,}1$ см$^{-1}$ соответственно. Аппроксимирующие зависимости для указанных величин затухания приведены на рис. 2 зеленым цветом. Вблизи пьезопреобразователя отмечается немонотонное изменение величины сигнала, что в большей степени наблюдалось при изучении дифракции на продольной акустической волне (см. рис. 1).

Приведенные величины затухания акустических волн можно преобразовать к другой размерности: $\alpha_L = 3{,}9 \pm 0{,}4$ дБ/см и $\alpha_S = 13{,}9 \pm 0{,}4$ дБ/см для сравнения с литературными данными. В случае продольной акустической волны, распространяющейся вдоль оси симметрии кристалла KRS-5, в литературе нет сведений о величине затухания. Но имеются данные о величине затухания продольной акустической волны, распространяющейся вдоль оси [100] кристалла KRS-6 – $\alpha_L = 3{,}8$ дБ/см ($f = 100$ МГц) [5]. Полученные значения очень близко, но их прямое сравнение является некорректным, так как кубические кристаллы KRS-5 и KRS-6 имеют разные химические составы. Для сдвиговой акустической волны, распространяющейся вдоль оси [100], в литературе приводится величина затухания $\alpha_S = 0{,}9$ дБ/см ($f = 100$ МГц) [5], что более чем в 10 раз меньше, чем полученные в работе результаты. Наиболее вероятно, что полученное различие связано с невысоким качеством имеющегося в наличии образца KRS-5.

Выводы

Представлены результаты теоретического и экспериментального изучения акустических свойств кристалла KRS-5. Полученные величины затухания акустических волн оказались выше литературных значений, что свидетельствует о невысоком качестве исследуемого образца. Однако высокие значения АО-качества, а также большой диапазон оптической прозрачности делают кристалл KRS-5 перспективным для использования в качестве основы для АО-приборов ИК-диапазонов.

Библиографический список

1. Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.

2. Gupta N. Investigation of a mercurous chloride acousto-optic cell based on longitudinal acoustic mode // Applied Optics. 2009. Vol. 48, № 7. P. 151.

3. Хоркин В. С., Поликарпова Н. В. Свойства объемных акустических волн для двух модификаций монокристалла теллура // Акустический журнал. 2022. Т. 68, № 3. С. 278–287.

4. Porokhovnichenko D. L., Dyakonov E. A., Ryu J., Balakshy V. I. Broadband Glan-type polarization scheme based on mercury halide crystal // Opt. Eng. 2021. Vol. 60, № 2. P. 020501.

5. Кристаллы галогенидов таллия: Получение свойства и применение / К. И. Авдиенко, В. Г. Артюшенко, А. С. Белоусов [и др.]; отв. ред. С. В. Богданов; АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т физики полупроводников. Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1989. 149 с.

6. Khorkin V. S., Voloshinov V. B., Kuznetsov M. S. Anisotropic acousto-optic interaction in a KRS-5 crystal // Appl. Opt. 2022. Vol. 61. P. 4397–4403.

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 656.7, 629.7.02

Е. А. Вознесенский
аспирант
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА

Рассматриваются вопросы актуальности разработок и особенности практической реализации автоматизированной беспроводной зарядной станции для беспилотных авиационных систем. Приводится структурная схема беспроводной передачи энергии, анализируются математические модели. Для решения поставленных задач была как выполнена практическая реализация прототипа автоматизированной системы заряда бортовых аккумуляторов беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа (вертикального взлета и посадки (VTOL)), так и разработано новое программное обеспечение. На основе полученных результатов КПД составляет 73,7%, что показывает достаточно высокую производительность.
Ключевые слова: беспилотные системы, автономная система управления, беспроводная зарядка беспилотных систем.

E. A. Voznesenskii
PhD Student
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF AN AUTOMATED WIRELESS CHARGING STATION FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES OF MULTIROTOR TYPE OR VTOL

The article discusses the relevance of the development and features of practical implementation, automated wireless charging station for unmanned aircraft systems. The structural scheme of wireless power transfer is given, mathematical models are considered. In order to solve the tasks set, both the practical implementation of a prototype of an automated system for charging on-board batteries of unmanned aerial vehicles of the multirotor type (vertical take-off and landing (VTOL)) and the developed new software were carried out. Based on the results obtained, the efficiency is 73,7%, which shows a sufficiently high performance.
Keywords: unmanned systems, autonomous control system, wireless charging of unmanned systems

Введение

Количество областей применения беспилотных авиационных систем увеличивается с каждым годом. Область продажи и услуг беспилотников растет в геометрической прогрессии [1]. Однако из-за несовершенства бортовых источников питания невозможно выполнить продолжительную полетную миссию без вмешательства оператора. Чтобы повысить степень автономии беспилотных мультироторных систем, а также VTOL, при этом не надеясь на изобретения будущего в области более совершенных гальванических элементов по сравнению с тем, что доступно сейчас, необходимо, помимо прочих инженерных про-

блем, разработать и создать инфраструктуру, способную обеспечить выполнение дроном поставленной продолжительной полетной миссии. Разработка и внедрение подобных систем в процесс работы беспилотника могли бы автоматизировать процессы, связанные с заменой или зарядом бортового аккумулятора.

Структурная схема

Беспроводная передача энергии (WPT – Wireless Power Transfer) – это технология передачи электрической энергии без проводов через воздушный зазор. Магнитно-резонансная система передача энергии – это форма индуктивной связи, в которой электрическая мощность передается через высокочастотное электромагнитное поле, образованное между двумя резонансными контурами, передатчиком и приемником (ресивером и трансмиттером). Для достижения этой цели постоянный ток от источника питания (DC) преобразуется в высокочастотный переменный ток (AC) с помощью специально разработанной силовой электроники, встроенной на стороне передатчика. Переменный ток питает медную проволочную катушку, которая генерирует высокочастотное магнитное поле. Как только приемная катушка помещается в непосредственное действие магнитного поля передающей катушки, это поле индуцирует переменный ток в приемной катушке. Полученный переменный ток затем преобразуется электроникой на стороне приемника обратно в постоянный для дальнейшего применения потребителем. Схема на рис. 1 описывает упрощенную концепцию WPT.

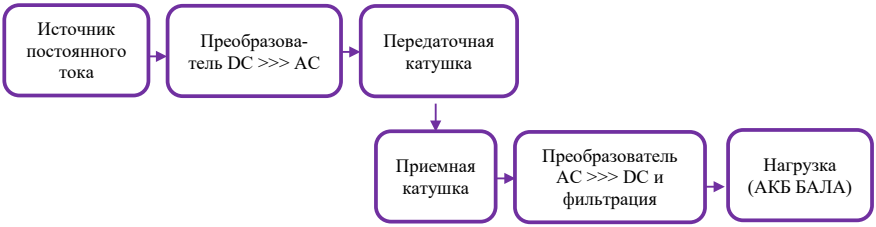


Рис. 1. Типичная структурная схема беспроводной передачи энергии

Данная система состоит из двух частей – передающей и принимающей. Каждая часть содержит катушку индуктивности, которая сделана из специального провода – литцендрата [2; 3]. Благодаря этому получается снизить влияние скин-эффекта, который проявляется на высоких частотах переменного тока. Толщина слоя в металле вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta = 503\sqrt{\frac{\rho}{f\mu m}}, \qquad (1)$$

Система питается от источника постоянного напряжения +24 В. Также поддерживается подключение литий-полимерного или литий-ионного аккуму-

лятора с конфигурацией 6SnP (максимальное напряжение такого аккумулятора составляет 25,2 В).

Главная задача передающей части системы – преобразовать постоянное напряжение питания в высокочастотное переменное и подать его на передающую катушку для генерации высокочастотного электромагнитного поля. Существуют разные схемы реализации таких инверторов: однотактные обратноходовые и прямоходовые преобразователи, двухтактный push-pull, полумостовая и полномостовая схемы. В данной исследовательской работе силовая часть разработана по схеме «полумост». Во-первых, в такой схеме задействован двухтактный принцип, что позволяет использовать оба полупериода переменного тока, чтобы иметь запас по мощности для дальнейших исследований: полумостовая схема применяется в преобразователях примерно до киловатта мощности и даже более. Во-вторых, такую топологию преобразователя проще и дешевле реализовать, по сравнению с push-pull или полномостовыми схемами.

В станции находится ШИМ-генератор для управления драйвером полумоста. Экспериментально наилучшая частота ШИМ-генератора была подобрана 37,1 кГц, что почти совпадает с теоретическими расчетами, вычисленными по формуле Томсона [3] (34,6 кГц):

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \qquad (2)$$

Также в передающей части предусмотрены реле для включения/выключения системы, воздушная система охлаждения, датчики тока, напряжения и температуры. Для управления всем этим в проекте используется отладочная плата на базе микроконтроллера ESP32. Ключевым фактором в выборе именно такой микроконтроллерной платформы является встроенный модуль Wi-Fi/Bluetooth, который позволяет подключить микроконтроллер к Интернету или создать собственную локальную сеть. В данном проекте благодаря ESP32 реализованы веб-сервер для мониторинга и управления WPT-станцией, а также связь между станцией и воздушной частью системы.

Приемная или воздушная часть содержит колебательный LC-контур, состоящий из приемной катушки индуктивности и высокотокового пленочного конденсатора. Приемная катушка в зоне действия магнитного поля, генерируемого передающей катушкой, индуцирует высокочастотный переменный ток. Его необходимо выпрямить и отфильтровать. В качестве выпрямителя используется мощный диодный мост, состоящий из диодов Шоттки, потому что они обладают высоким быстродействием и малым падением напряжения. Диодный мост совместно с электролитическим конденсатором большой емкости образует выпрямительный блок. Далее необходим понижающий импульсный стабилизатор (DC-DC-преобразователь) с возможностью ограничения тока, чтобы была возможность заряжать литий-полимерные аккумуляторы алгоритмом заряда CC-CV. Согласно анализу элементной базы, подошел готовый модуль, выполненный на основе микросхемы XL4016E1 [3].

Результаты практической реализации автоматизированной беспроводной зарядной станции для беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа или VTOL

На рис. 2–3 представлены фотографии разработанной системы автоматизированной зарядки мальтироторных беспилотников и VTOL-систем по технологии беспроводной передачи энергии посредством метода электромагнитной индукции, а также интерфейс веб-сервера для мониторинга и управления системой. Коды программ клиентской и серверной части прошли государственную регистрацию [4; 5].

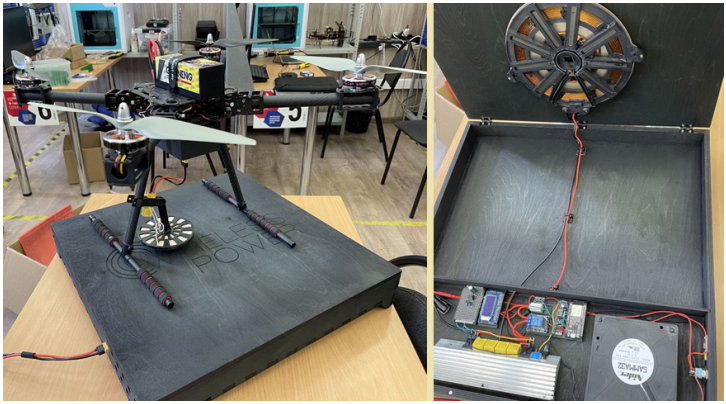


Рис. 2. Практическая реализация автоматизированной беспроводной зарядной станции для беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа

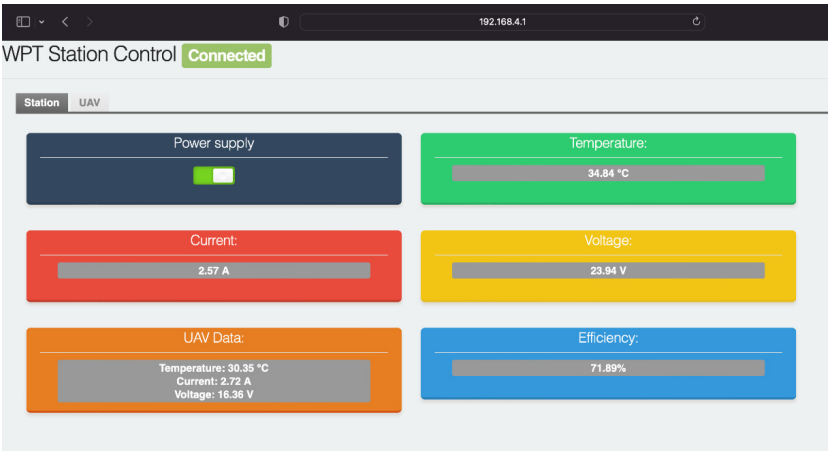


Рис. 3. Графический интерфейс веб-сервера

Тестирование системы

Разработанный прототип системы автоматизированной зарядки имеет 8 степеней защиты: три программные на стороне трансмиттера (по напряжению, по току и по температуре), три программные на стороне ресивера (также по напряжению, по току и по температуре), защита по току предохранителем, и последняя – автоматическое отключение от питания силовой электроники при обесточивании микроконтроллера.

Зарядная станция вместе с приемным модулем получилась довольно мощной и эффективной: удалось заряжать аккумуляторы мощностью 75 Вт при КПД 73,7%.

Библиографический список

1. Отчет о мировом рынке услуг дронов. ULR: https://markets.businessinsider.com/news/stocks/global-drone-service-market-report-2019-market-is-expected-to-grow-from-usd-4-4-billion-in-2018-to-usd-63-6-billion-by-2025-at-a-cagr-of-55-9-1028147695 (дата обращения: 15.03.2023).

2. Kostin A. S. Models and methods for implementing the automous performance of transportation tasks using a drone // WECONF 2021. 9470584.

3. Voznesenskii E. A. Automated Battery Charging System for Multi-Rotor Aerial Vehicles // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF) 2021. Saint-Petersburg. 2021. 9470571.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2022682846 РФ. Программа автономной базовой станции квадрокоптера для зарядки аккумулятора и передачи данных о статусе квадрокоптера на серверную часть базовой станции. 28.11.2022 / Костин А. С., Вознесенский Е. А. // Реестр программ ЭВМ. 2022. 1 с.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2022682847. Программа автономной базовой станции квадрокоптера для зарядки аккумулятора и передачи данных о дроне с клиентской части в веб интерфейс. 28.11.2022 / Костин А. С., Вознесенский Е. А. // Реестр программ ЭВМ. 2022. 1 с.

УДК 65.012.1, 656.072

А. А. Добровольская*
ассистент
Н. Н. Майоров*
доктор технических наук, доцент
М. Р. Язвенко*
лаборант
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ РАЗВИТИЯ МОРСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ПОРТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗНЫХ ПРИОРИТЕТОВ ЗАЯВОК СУДОВ

Под действием внешней среды руководители транспортных терминалов при решении задачи прогнозирования развития находятся в ситуации принятия решений при неопределенности. Особенно ситуация актуальна для морских пассажирских транспортных систем и терминалов, так как наблюдается ситуация восстановления интенсивности работы и пассажиропотока. Однако классические модели не позволяют получить полный диапазон возможных колебаний интенсивностей судов. Именно разработка специализированных транспортных моделей является возможностью формирования необходимого количества альтернатив. Приведено решение на основе использования моделей принятия решений при неопределенности. Для повышения точности данных представлена модель с учетом разных приоритетов заявок паромных и круизных судов для пассажирского порта Санкт-Петербурга «Морской фасад». Полученные результаты позволяют повысить точность данных и улучшить принятие решения при неопределенности. Приведенное решение можно применить для других морских пассажирских и транспортных терминалов.
Ключевые слова: транспортные процессы, математическое моделирование, паромная сеть, стохастическая модель, модернизация инфраструктуры, морской пассажирский порт, принятие решений при неопределенности.

A. A. Dobrovolskaia*
Assistant
N. N. Maiorov*
Dr. Sc., Tech., Professor
M. R. Yazvenko*
Laboratory Assistant
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DECISION-MAKING UNDER UNCERTAINTY IN FORECASTING THE EVELOPMENT OF A SEA PASSENGER PORT BASED ON THE MODELING OF DIFFERENT PRIORITIES OF SHIPS

Under the influence of the external environment, the managers of transport terminals are in a situation of decision-making under uncertainty when solving the problem of forecasting devel-

opment. The situation is especially relevant for marine passenger transport systems and terminals, as the situation of restoring the intensity of operation and passenger traffic is observed. However, the classical models do not allow obtaining the full range of possible fluctuations of vessel intensities. It is the development of specialized transport models is an opportunity to form the necessary number of alternatives. The article presents a follow-up solution based on the use of decision-making models under uncertainty. To increase accuracy of the data the model is presented, taking into account different priorities of ferry and cruise ship requests for passenger port of St. Petersburg «Sea Facade». The obtained results allow to increase data accuracy and improve decision making under uncertainty. The given solution can be applied to other sea passenger and transport terminals.
Keywords: transport processes, mathematical modeling, ferry network, stochastic model, infrastructure modernization, sea passenger port, decision making under uncertainty.

Введение

Исследование, оценка и прогнозирование инфраструктуры транспортных узлов на основе моделирования сегодня принимает особенную актуальность. В статье [1] представлено моделирование потока круизных и паромных судов специализированного морского пассажирского порта Санкт-Петербурга «Морской фасад». По результатам моделирования был спрогнозирован интервал возможных колебаний количества судов, прибывающих в пассажирский морской терминал в течение года, на основе значения интенсивности до 2019 г. Интенсивность судопотока – это динамически изменяющаяся в течение года величина. На графике рис. 1 представлен график судозаходов в порт с 2015 по 2019 г.

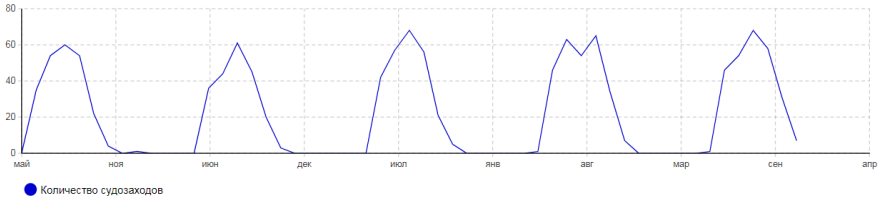


Рис. 1. Исходная интенсивность работы морского пассажирского порта

При принятии решений по вариантам модернизации инфраструктуры лица, принимающие решения (далее – ЛПР), сталкиваются с принятием решений в условиях неопределенности. Руководитель должен четко понимать границы результатов, которые он может ожидать в прогнозируемом периоде. В рамках этих границ можно выделить антиутопическое решение, при котором ожидается худший исход событий, а также утопическое решение – идеальное, к которому должно стремиться ЛПР при наилучших обстоятельствах. Поэтому необходимо внедрение специализированных информационных подпрограмм, которые позволяют повысить точность принятия решений.

Модели и методы исследования принятия решений по оценке загруженности морского порта при неопределенности

Рассмотрим полученные в статьях [1–3] результаты моделирования для поиска области и направления предпочтения ЛПР. Используем для анализа критерий Сэвиджа [4]. Для этого критерия характерна пессимистическая позиция ЛПР к возможным потерям из-за недостатка информации. Для решения данным критерием реализуется матрица рисков и потерь *L*. Сначала определяется условное решение X_y, которое соответствует утопическому решению в поле полезностей. Затем матрица потерь *L* строится по потерям относительно утопического решения X_y по каждому решению для каждой возможной ситуации. При анализе матрицы потерь за основу принимаются самые неблагоприятные варианты потерь для каждого из доступных решений по всем ситуациям, не зависящим от ЛПР. Наиболее приемлемым результатом выбирается наименее рискованная стратегия из всех. Функция, задающая семейство линий уровня, выглядит следующим образом:

$$f(u;v;...;z) = \max\{a_{y1} - u; a_{y2} - v; ...; a_{yn} - z\}. \quad (1)$$

Исходя из этого, можно формализовать задачу нахождения наилучшего решения.

Пусть i – вариант возможного решения ЛПР $(i = 1,2,...,m)$; j – вариант возможной ситуации $(j = 1,2,...,m)$; a_{ij} – доход ЛПР, если будет принято решение *i*, а ситуация сложится *j*-я; $A = (a_{ij})$ – матрица полезностей; $L = (l_{ij})$ – соответствующая матрица потерь или рисков.

Целевая функция критерия

$$Z_S = \min_i\{K_i\}, \quad (2)$$

где $K_i = \max_j\{l_{ij}\}$; $l_{ij} = \max_i\{a_{ij}\} - a_{ij}$.

Таким образом, решение задачи нахождения оптимального решения на основе *S*-критерия имеет следующую графическую интерпретацию (рис. 2). Пусть вдоль линии, которая проходит через утопическую точку УТ поля полезностей, причем параллельно биссектрисе первого координатного угла, передвигается «угол предпочтения». Он представляет собой угол, вершина которого лежит на указанной биссектрисе, а стороны угла идут по границе соответствующего конуса предпочтений. При этом движение осуществляется именно в направлении к утопической точке УТ. Тогда последняя (из анализируемых) точка в поле полезностей, которую «захватит» этот инструмент при указанном движении, как раз и будет представлять решение, которое соответствует выбору *S*-критерия.

На основе рис. 2 полученная область поля полезностей ограничивается антиутопической точкой со значением 240 судов и утопической точкой со значением 320 судов. Другие решения, не попадающие в это поле, в расчеты не

принимаются, поскольку были отброшены еще в [1; 2]. Оптимальное решение представляет собой угловую линию уровня, которая углом «двигается» по пунктирной линии, биссектрисе первого координатного угла.

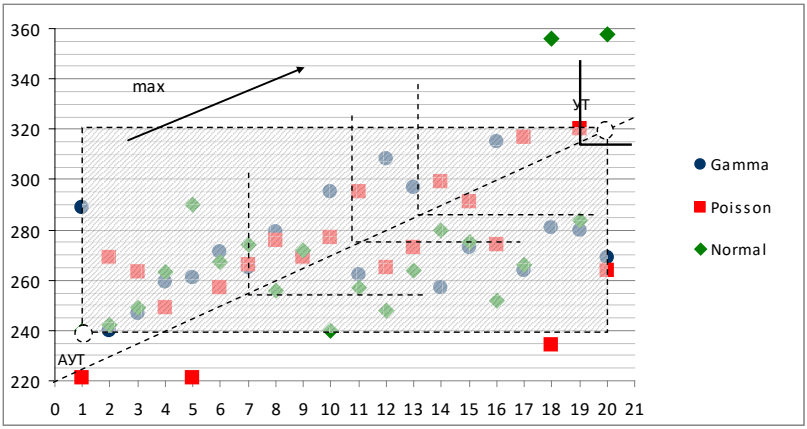


Рис. 2. Графическая интерпретация выборки годовых интенсивностей и формирования предпочтительных параметров

Выделенная область оптимального решения ограничена полужирной линией на рис. 2.

Практическая реализация цифровой модели с учетом приоритетности круизных и паромных судов

Основным недостатком моделирования в [1] было отсутствие приоритетного разделения по причалам. А именно: рассматривался поток идентичных судов, не отличавшихся по своим размерам (проблематика детально приведена в работах [2; 3]). В реальной системе причалы имеют ограниченную длину и не могут принять суда крупных размеров. Соответственно, в случае когда в порт прибывает небольшое судно, оно должно занимать причалы для более крупных судов только в случае занятости всех подходящих только небольшим судам. Новая модель создана с учетом приоритетного обслуживания крупных судов и дифференциации причалов по размерам принимаемых судов.

На вход модели посылаются интенсивности поступления судов по каждому из типов, выделенных в статье [1]: 31 небольшое судно, 118 средних и 112 крупных. Проводится 20 экспериментов с различными настройками генератора случайных чисел эксперимента AnyLogic [5], и результаты также анализируются по критерию Сэвиджа. Оконная форма имитационной модели приведена на рис. 3.

Рис. 3. Оконная форма модели цифровой транспортной модели

На основе выполненного моделирования сформирован набор прогнозных данных для последующего принятия решений при неопределенности (рис. 4).

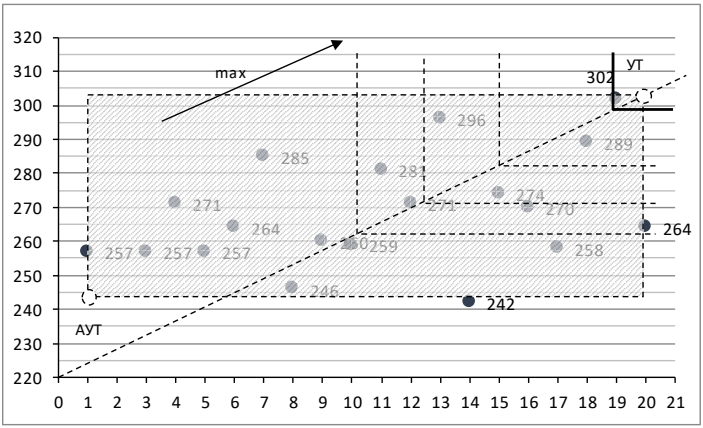


Рис. 4. Уточнение параметров интенсивностей для принятия решений по загруженности транспортной системы

Заключение

По результатам моделирования морского пассажирского порта при заданных параметрах инфраструктуры и на основе реальных данных об интенсивностях входного потока судов с использованием моделей приоритетов в очередях были получены более точные результаты моделирования с помощью вероятностной модели, более точные интервалы интенсивностей круизных и

паромных судов. Они были оценены с точки зрения принятий решений в условиях неопределенности методом Сэвиджа с целью решения задачи прогнозирования развития для морского пассажирского порта. В ходе оценки были определены интервалы полей предпочтений и направление предпочтений ЛПР для выработки стратегических действий по последующей модернизации инфраструктуры. Предлагаемые модели реализованы в специальном модуле цифровой транспортной модели, выполненной в программной среде AnyLogic.

Библиографический список

1. Добровольская А. А., Майоров Н. Н., Язвенко М. Р. Исследование вариантов модернизации инфраструктуры транспортного терминала на основе вероятностных моделей // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: XXV Междунар. науч. конф. (СПб., 30 мая – 3 июня 2022 г.): сб. ст.: в 3 ч. Ч. 3. СПб., 2022. С. 162–170.
2. Krile S., Maiorov N., Fetisov V. Modernization of the Infrastructure of Marine Passenger Port Based on Synthesis of the Structure and Forecasting Development. Sustainability. 2021. Vol. 13. 3869.
3. Майоров Н. Н., Фетисов В. А., Добровольская А. А. Вероятностная модель прогнозирования прибытия круизных или паромных судов в морской порт для оценки инфраструктуры // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2022. Т. 14, № 2. С. 169–180.
4. Бродецкий Г. Л. Системный анализ в логистике. Принятие решений в условиях неопределенности. М.: Academia. 2010. 336 с.
5. Anylogic. URL: https://www.anylogic.ru/ (дата обращения: 22.01.2022).

УДК 656.614.32

О. А. Изотов
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВНЕДРЕНИЯ НОВЫХ СРЕДСТВ УКРУПНЕНИЯ СБОРНЫХ ГРУЗОВ В КОНТЕЙНЕРНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Рассмотрена возможность повышения эффективности перевозок сборных парий грузов в глубь страны с применением преимуществ контейнерных технологий. Решение основано на применении нового внутриконтейнерного средства укрупнения грузов.
Ключевые слова: сборные грузы, контейнерные технологии, транспортная инфраструктура, средства укрупнения грузовых мест.

O. A. Izotov
PhD, Tech., Associate Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITIES OF INTRODUCING NEW MEANS OF CONSOLIDATION OF COMBINED CARGOES INTO CONTAINER TRANSPORT SYSTEMS

The possibility of increasing the efficiency of transportation of combined shipments inland using the advantages of container technologies is considered. The solution is based on the use of a new in-container means of cargo consolidation.
Keywords: combined cargoes, container technologies, transport infrastructure, means of consolidation of cargo spaces.

Введение

Современные контейнерные перевозки – это способ транспортировки грузов с использованием контейнеров различной вместимости и грузоподъемности, призванных обеспечить доставку грузов от склада отправителя до склада получателя без дополнительных перегрузочных операций на маршруте следования. Система доставки грузов от грузоотправителя до грузополучателя в контейнерах различными видами транспорта получила название контейнерной транспортной системы.

Таким образом, контейнерная транспортная система – это комплекс привлекаемых к перевозке технических средств, применяемых технологических процессов и организационно-управленческих мер [1; 2], экономических, правовых норм, призванных обеспечить эффективную перевозку грузов.

Обсуждение

Технической базой контейнерной транспортной системы являются сами контейнеры различной грузоподъемности и грузовместимости, средства их

транспортировки на привлекаемых к перевозке видах транспорта, сеть контейнерных и грузовых терминалов, региональных центров консолидации и распределения грузопотоков, перегрузочное оборудование необходимое для производства погрузочно-разгрузочных работ [3; 4]. При этом в транспортном отношении, контейнер – это прежде всего особый вид съемного кузова подвижного состава, приспособленный для погрузки и выгрузки его в подвижной состав видов транспорта и из него, а также для размещения и транспортировки в нем грузов широкой номенклатуры. В результате контейнер сам по себе является укрупненной грузовой единицей транспортного оборудования, что позволяет объединять разрозненные грузовые места, сборные грузы в одно более крупное. И чем более крупным в целях достижения эффекта масштаба становится контейнер, тем все более сужается транспортная контейнерная система как сфера, обеспечивающая его продвижение в материковую часть страны назначения грузов.

Количество объектов инфраструктуры, способных к обработке большегрузных контейнеров, подпадает в прямую зависимость от массы контейнера. Грузоподъемность средств транспортировки видов транспорта, грузоподъемность перегрузочного оборудования в пунктах перевалки контейнеров с одного вида транспорта на другой, допустимая нагрузка на железнодорожное полотно (дорожное покрытие) по маршруту перевозки, возможность размещения контейнеров на складских площадях грузовых терминалов, возможность организации перегрузки контейнеров с одного вида транспорта на другой при организации смешанной перевозки, в том числе по прямому варианту, и, наконец, необходимость возвращения морского контейнера обратно в порт в сроки его свободного обращения – те факторы, которые становятся ограничениями при формировании контейнерной транспортной системы. В результате нередко владелец сборной партии грузов вынужден соглашаться на преждевременное, не в пункте назначения, освобождение контейнера от груза, дополнительные перегрузки своего груза и в итоге терять возможность использовать все преимущества контейнерных технологий доставки грузов.

В целях расширения границ контейнерных транспортных систем предлагается рассмотреть возможность применения нового средства укрупнения малых партий грузов – внутриконтейнерного модуля грузоподъемностью 5–7 т, пригодного к переработке на типовых железнодорожных станциях, открытых к приемке малотоннажных контейнеров. Применение таких модулей предполагает пересмотр вариантов организации доставки малых партий грузов с применением контейнерных технологий.

Преимущества очевидны:

– внедрение внутриконтейнерного модуля позволяет перенести основную тяжесть перегрузочных операций с перегрузки тарно-штучных грузов на перегрузку грузов в контейнерах (в модулях);

– стоимость и продолжительность перегрузки контейнера (модуля) меньше стоимости и продолжительности перегрузки тарно-штучных грузов;

– дальность перевозки грузов в модулях больше дальности завоза грузов в контейнерах в силу ограничения по свободным дням пользования, назначенным грузовой морской линией, для последнего (рис. 1).

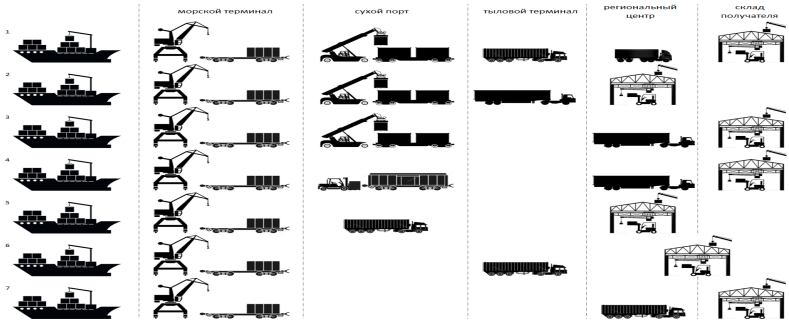


Рис. 1. Варианты доставки сборных грузов в контейнерах

При организации перевозки малой партии груза во внутриконтейнерном модуле контейнер является лишь средством укрупнения модулей нескольких владельцев. В промежуточном пункте перегрузки с одного вида транспорта на другой модуль выгружается из большегрузного контейнера и следует как самостоятельная укрупненная грузовая единица, обладающая всеми функциями современного контейнера. Кроме того, модуль остается свободным от ограничений, наложенных морской линией на контейнер, и может быть доставлен в пункт назначения груза малотоннажными транспортными средствами смежных видов транспорта (рис. 2).

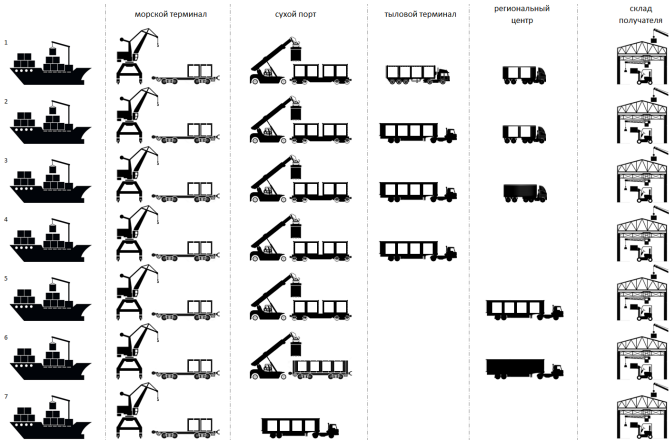


Рис. 2. Варианты доставки сборных грузов в модулях

Решение

В предложенном материале рассмотрены 11 наиболее часто встречающихся вариантов доставки грузов в контейнерах и столько же возможных вариантов доставки грузов в модулях. Для наглядности на рис. 3 приведена оценка возможности увеличения дальности перевозок и вероятности дальнейшей отправки грузов в контейнерах (модулях) до того или иного промежуточного пункта перевалки из 11 возможных сравниваемых вариантов доставки.

Как видно из представленного материала [5–7], при равных стартовых позициях всех 11 вариантов перевозки грузов в контейнерах и в модулях, до конечного пункта назначения (склада грузополучателя) с вариантностью 0,09 груз будет доставлен только по одному из вариантов перевозок. А при организации доставки грузов в модулях до конечного пункта назначения (склада грузополучателя) с вариантностью 0,36 груз будет доставлен по четырем из возможных вариантов построения маршрутов транспортировки. Вместе с тем при организации доставки грузов в модулях грузополучатель на любом этапе продвижения грузов в глубь материка получит возможность забрать свой груз из отдельного модуля, а не из контейнера, в котором консолидирована отправка сборной партии грузов нескольких владельцев.

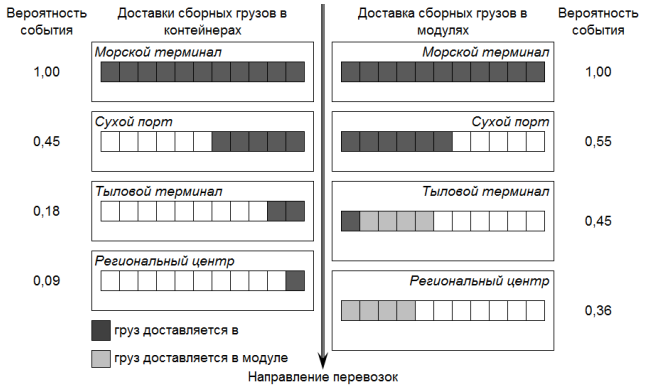


Рис. 3. Оценка возможности увеличения дальности перевозок и вероятности доставки грузов в контейнерах (модулях) из 11 возможных вариантов доставки

Выводы

Модуль может стать альтернативой выходящих из употребления 3- и 5-тонных железнодорожных контейнеров, обращение к которым при перевозке грузов в большегрузных контейнерах потребовало бы дополнительной перевалки тарно-штучных грузов, и новой формой услуг, предлагаемой экспедиторами владельцам малых партий грузов. Даже погрузка модулей в железнодорожные вагоны потребует не крытого подвижного состава и не специальной контейнерной платформы, а полувагона (см. рис. 2, варианты 6 и 10), тариф за который значительно ниже.

Библиографический список

1. Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Щербакова-Слюсаренко В. Н. Эволюция показателей, характеризующих эксплуатационную работу портов и терминалов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2017. Т. 9, № 5. С. 909–924.

2. Изотов О. А., Кузнецов А. Л. Определение сфер и границ применения новых средств укрупнения сборных грузов в контейнерных перевозках // Транспортное дело России. 2020. № 2(147). С. 164–166.

3. Изотов О. А. Организация погрузо-разгрузочных работ новых единиц укрупнения сборных грузов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2019. Т. 11, № 5. С. 813–822.

4. Изотов О. А., Кузнецов А. Л. Перспективы развития технологий перевозки сборных грузов в контейнерах // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 1. С. 140–148.

5. Изотов О. А., Гультяев А. В., Кузнецов А. Л. Перспективы экспедирования морских контейнерных перевозок // Транспортное дело России. 2019. № 4 (143). С. 130–136.

6. Изотов О. А. Преимущества внедрения новых средств укрупнения сборных грузов в контейнерные перевозки // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2019. Т. 11, № 6. С. 1037–1043.

7. Патент на полезную модель № 207180. Складной грузовой контейнер / Кузнецов А. Л., Изотов О. А. Опубл. 15.10.2021.

УДК 656.7

А. С. Костин*
аспирант
Ю. А. Силин*
студент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА БЕСПИЛОТНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА

На данный момент технологии достигли уровня развития, позволяющего начать повсеместное использование беспилотного водного транспорта. Благодаря искусственному интеллекту и компьютерному зрению для правильной работы беспилотного судна не требуется постоянная связь типа «сервер – клиент» по причине того, что судно может самостоятельно прокладывать себе маршрут, руководствуясь навигационными системами ГЛОНАСС и GPS, а также компьютерным зрением и датчиками, такими как эхолот и лидар. В рамках игры Game of Goals, посвященной водному транспорту, в лаборатории беспилотных авиационных систем ГУАП был разработан концепт беспилотного пассажирского судна.
Ключевые слова: беспилотные системы, водный транспорт, системы навигации, автономная система управления.

A. S. Kostin*
PhD Student
Yu. A. Silin*
Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE PROJECT OF AN UNMANNED TRANSPORT SYSTEM FOR RIVER TRANSPORT

At the moment, technologies have reached a level of development that allows the widespread use of unmanned water transport to begin. Thanks to artificial intelligence and computer vision, a constant server–client communication is not required for the proper operation of an unmanned vessel, due to the fact that the vessel can independently navigate its route guided by GLONASS and GPS navigation systems, as well as computer vision and sensors such as echo sounder and lidar. As part of the Game of Goals, dedicated to water transport, the concept of an unmanned passenger vessel was developed in the laboratory of unmanned aircraft systems of SUAI.
Keywords: unmanned systems, water transport, navigation systems, autonomous control system.

Введение

Возрастающая загруженность водного транспорта создает потребность в автоматизации транспортных процессов для увеличения его пропускной способности и повышения безопасности [1]. С текущим уровнем развития технологий уже можно создать надежную автономную систему управления пассажирским судном. В качестве системы навигации наиболее оптимально использова-

ние ГЛОНАСС и GPS [2]. Для более точного определения местоположения и надежности в случае потери сигнала, необходимо также использовать 3D-карту рельефа дна, которая будет сопоставляться с данными, получаемыми с эхолота.

Предполагаемый принцип работы

Для контроля местоположения и согласования маршрутов следования должна непрерывно осуществляться связь «сервер – клиент», где клиентами являются беспилотные и пилотируемые системы, а сервером – специализированная наземная станция. Беспилотные системы следуют заданному сервером маршруту, а пилотируемые посылают серверу информацию о своем местоположении для прогнозирования их маршрута и внесения корректировок в маршруты беспилотных систем. При данном типе связи минимизируется риск столкновений по причине отсутствия человеческого фактора. Также необходимо наличие резервного протокола действий в случае потери связи, например движение к ближайшему причалу с использованием датчиков и компьютерного зрения.

Создание концептуальной модели беспилотной системы

При создании модели за основу был взят принцип удержания судна внутри разрешенной зоны [3; 4]. Разрешенной считается та часть реки, по которой проходит составленный сервером маршрут. Также при движении в данной части маршрута судно способно огибать встречающиеся на пути препятствия. В качестве границы разрешенной зоны будет использоваться черная линия. При работе данной модели выставлена минимальная поддерживаемая драйвером скорость работы мотора 115 оборотов в минуту. При повороте мотор-редуктор меняет угол при помощи установленного на него сервопривода. Система навигации работает на основе анализа данных (рис. 1), поступающих с инфракрасных датчиков линии. Анализируются поступающие данные следующим образом:

1) при получении сигнала с датчика, установленного на левом борту, судно осуществляет поворот в правую сторону;

2) при получении сигнала с датчика, установленного на правом борту, судно осуществляет поворот в левую сторону.

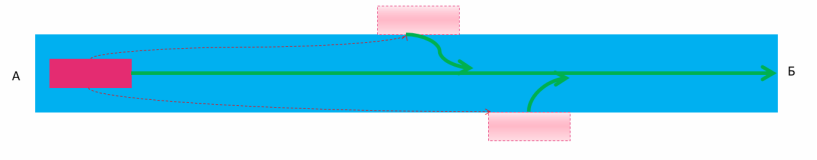


Рис. 1. Схема работы системы

В модель входят следующие электронные компоненты (рис. 2): микроконтроллер Arduino nano [5]; понижающий DC-DC преобразователь – 1 шт.;

датчик линии TCRT5000 – 2 шт. [6]; драйвер коллекторного двигателя L298N – 1 шт. [7]; мотор-редуктор – 1шт.; сервопривод SG90 – 1 шт.

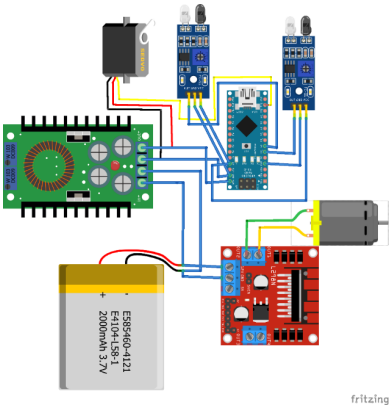


Рис. 2. Принципиальная электронная схема

Для работы данной модели на микроконтроллер загружен следующий программный код:

```
#define PIN_SENSOR1  4
#define PIN_SENSOR2  5
#define PIN_ENA 9
#define PIN_IN1 7
#define PIN_IN2 6
#include <Servo.h>
int servoPin = 11;
Servo Servo1;;
void setup() {
  pinMode(PIN_SENSOR1, INPUT);
  pinMode(PIN_SENSOR2, INPUT);
  Servo1.attach(servoPin);
  pinMode(PIN_ENA, OUTPUT);
  pinMode(PIN_IN1, OUTPUT);
  pinMode(PIN_IN2, OUTPUT);
  digitalWrite(PIN_IN1, LOW);
  digitalWrite(PIN_IN2, HIGH);
}
void loop() {
  analogWrite(PIN_ENA, 115);
  Servo1.write(80);
  if(digitalRead(PIN_SENSOR1)==0){
    Servo1.write(60);
    delay(1000);
```

```
    }
    if(digitalRead(PIN_SENSOR2)==0){
      Servo1.write(110);
      delay(1000);
    }
  }
```

Все электронные компоненты установлены на трехколесной платформе, распечатанной на 3D-принтере (рис. 3). Ведущее переднее колесо приводится в движение при помощи мотор-редуктора. ИК-датчики линии установлены на выносных элементах с правой и левой стороны.

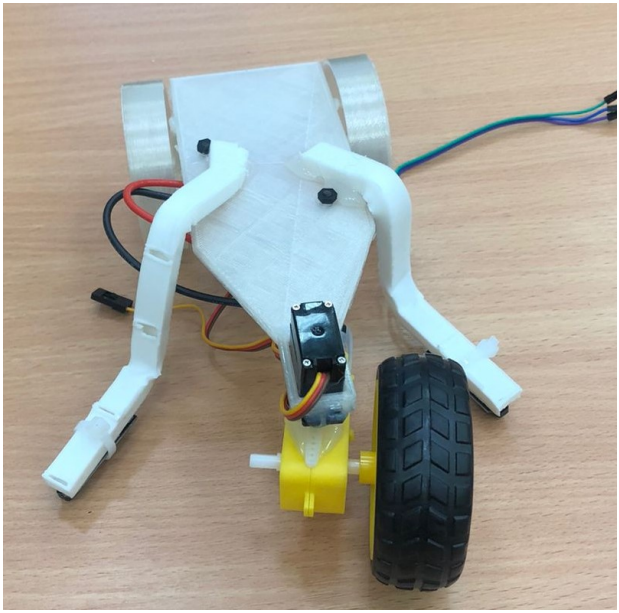


Рис. 3. Внешний вид разработанной модели

Заключение

Была разработана концептуальная модель, способная перемещаться по имитации русла реки, а также огибать препятствия на основе анализа данных, получаемых с ИК-датчиков. Для повышения эффективности работы данной модели необходимо улучшить программный код путем добавления в него большего количества сценариев развития действий. Данное улучшение позволит модели без ошибок и более точно проходить трассы повышенной сложности, а также огибать препятствия большего размера. Для повышения точности позиционирования необходимо добавить дальномер, работающий в горизонтальной плоскости.

Библиографический список

1. Силин Ю. А. Анализ аппаратных комплексов для доставки особо важных грузов с помощью беспилотных авиационных систем // Системный анализ и логистика. 2021. № 3 (29). С. 9–14.

2. Силин Ю. А. Разработка охлаждающего контейнера способного поддерживать заданную температуру при транспортировке // Системный анализ и логистика. 2021. № 2 (28). С. 97–103.

3. Костин А. С., Майоров Н.Н., Вознесенский Е. А., Богатов Н. В. Исследование маршрутизации полетных заданий беспилотных авиационных систем для операционных складских задач // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: сб. докл. второй Междунар. науч. конф. СПб., 2021. С. 130–137.

4. Maiorov N. N., Bogatov N., Kostin A. Control and analysis of quadcopter flight when setting a complex trajectory of motion // Journal of Physics: Conference Series 1925. 2021. 012043.

5. Техническая документация Arduino nano. URL: https://docs.arduino.cc/hardware/nano (дата обращения: 26.03.2023).

6. Техническая документация датчика линии TCRT5000. URL: https://amperkot.ru/spb/catalog/datchik_linii_tcrt5000-23871288.html (дата обращения: 26.03.2023).

7. Драйвер двигателя L298N. URL: https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/drayver-dvigatelya-l298n/ (дата обращения: 26.03.2023).

УДК 006.91

М. Д. Рассыхаева*
ассистент
Д. Ф. Казадио*
студент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ

Рассмотрено метрологическое обеспечение в электромеханике как необходимость для обеспечения точности и надежности измерений, проводимых в процессе проектирования, производства, эксплуатации и обслуживания электромеханических систем и устройств. Метрологическое обеспечение включает создание и согласование стандартных методов измерений, разработку и калибровку эталонов, контроль качества производства, а также создание систем управления качеством. Все это позволяет обеспечить соответствие продукции требованиям стандартов и нормативных документов, а также безопасность и эффективность работы электромеханических систем и устройств. Кроме того, метрологическое обеспечение позволяет предотвращать возможные отказы и аварии, которые могут привести к серьезным последствиям в работе электромеханических систем и устройств.
Ключевые слова: метрология, контроль качества, точность измерений.

M. D. Rassykhaeva*
Assistant
D. F. Kazadio*
Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

METROLOGICAL SUPPORT IN ELECTROMECHANICS

The article considers metrological support as a necessity in electromechanics to ensure the accuracy and reliability of measurements taken during the design, production, operation and maintenance of electromechanical systems and devices. Metrological support includes the creation and coordination of standard measurement methods, the development and calibration of standards, production quality control, and the creation of quality management systems. All this makes it possible to ensure that products comply with the requirements of standards and regulatory documents, as well as to ensure the safety and efficiency of electromechanical systems and devices. In addition, metrological support makes it possible to prevent possible failures and accidents that can lead to serious consequences in the operation of electromechanical systems and devices.
Keywords: metrology, quality control, accuracy of measurements.

Введение

Метрологическое обеспечение в электромеханике – это совокупность мероприятий, направленных на обеспечение точности, надежности и воспроизводимости измерений, проводимых в процессе проектирования, производства, эксплуатации и обслуживания электромеханических систем и устройств. Метрологическое обеспечение включает следующие аспекты.

1. Разработка и согласование методов и средств измерений. Это разработка стандартных методов измерений, а также согласование этих методов с другими организациями и производственными предприятиями.
2. Создание и калибровка эталонов. Это процесс создания эталонов единиц измерения, которые служат для проверки и калибровки средств измерений. Эталоны должны соответствовать требованиям международных стандартов и иметь высокую точность и надежность.
3. Обеспечение точности и надежности средств измерений. Это проверка и калибровка средств измерений на эталонах, а также разработка и согласование методов проведения измерений.
4. Контроль качества производства. Это контроль качества производства электромеханических систем и устройств, в том числе контроль размеров и формы деталей, качества материалов и т. д.
5. Системы управления качеством. Это создание и внедрение систем управления качеством, которые позволяют обеспечить соответствие продукции требованиям стандартов и нормативных документов.

Основы метрологического обеспечения

Современные методы и технологии метрологического обеспечения в электромеханике также позволяют проводить диагностику электромеханических систем и устройств в режиме реального времени, что дает возможность оперативно реагировать на проблемы и сбои в работе системы. Кроме того, метрологическое обеспечение является важным элементом для проведения научных исследований и разработок в области электромеханики. Оно позволяет получать точные и надежные данные, которые могут быть использованы при проектировании новых систем и устройств, а также для улучшения существующих.

В электромеханике используются различные методы и средства измерений для определения различных параметров и характеристик электромеханических систем и устройств. Для измерения напряжения и тока применяются осциллографы, мультиметры, амперметры, вольтметры. Значение сопротивления можно установить при помощи омметров и мультиметров, мощности – при помощи ваттметров, мультиметров и датчиков мощности. Частоту можно найти посредством частотомеров, осциллографов и датчиков частоты. Для измерения давления и температуры используются датчики давления и термометры, для ускорения и вибраций – акселерометры и виброметры, магнитных полей – магнитометры. Уровень звука можно узнать при помощи звуковых метров [1].

Методология проведения метрологического обеспечения в электромеханике основывается на определении целей и задач метрологического обеспечения. На этом этапе определяются параметры, которые будут измеряться, а также требования к точности измерений и к оборудованию, которое будет использоваться для измерений. Разрабатывается план метрологического обеспечения: определяются методы измерений, типы оборудования, необходимые для проведения измерений, а также порядок проведения измерений. Проводятся метроло-

гические измерения параметров электромеханических систем и устройств с помощью специального оборудования. Обрабатываются результаты измерений и оценивается точность. Здесь производится обработка полученных данных и оценка точности измерений. Если необходимо, проводится повторное измерение. Составляется отчет о результатах метрологического обеспечения, где должны быть представлены данные об измеренных параметрах, оценка точности измерений, а также рекомендации по дальнейшей работе и улучшению электромеханических систем и устройств.

Контроль качества при метрологическом обеспечении в электромеханике включает ряд мероприятий, которые направлены на обеспечение соответствия результатов измерений требованиям точности и надежности.

Одни из ключевых мероприятий – контроль и калибровка оборудования, используемого для проведения измерений. Оборудование должно регулярно проходить калибровку и проверку на соответствие требованиям к точности. В случае обнаружения несоответствия должны быть проведены настройка или ремонт оборудования. Другое важное мероприятие – повторное измерение. Если результаты измерений получились неоднозначными или не удовлетворяют требованиям точности, необходимо провести повторное измерение. При этом можно использовать другие методы измерений или другое оборудование, чтобы уточнить результаты. Также важно обеспечить правильное хранение и использование образцов и эталонов, которые используются для калибровки и проверки оборудования. Контроль качества при метрологическом обеспечении в электромеханике также включает оценку погрешностей и неопределенностей измерений, анализ результатов измерений и устранение причин ошибок [2].

Наконец, важно обеспечить надлежащую документацию, которая включает отчеты о результатах метрологических измерений, протоколы калибровки оборудования, спецификации и другие документы, связанные с метрологическим обеспечением в электромеханике. Это позволяет обеспечить контроль качества, а также возможность повторного использования результатов измерений в будущем.

Метрологическое обеспечение – неотъемлемая часть процесса измерений и контроля качества продукции в различных областях, включая электромеханику. Оно необходимо для обеспечения точности и надежности результатов измерений, которые используются для контроля качества и производства, а также для различных научных и исследовательских целей.

Конкретно в электромеханике метрологическое обеспечение используется для контроля геометрических параметров и измерения электрических величин, таких как напряжение, ток, сопротивление и др. Результаты измерений используются для проектирования, разработки и контроля качества электромеханических систем и устройств, а также для определения и устранения возможных неисправностей в этих системах. Метрологическое обеспечение также необходимо для обеспечения соответствия продукции требованиям стандартов и нормативных документов. Например, для выпуска электронных компонентов

и устройств необходимо обеспечить соответствие стандартам, таким как ISO, IEC, IEEE и др.

Основные стандарты и нормативные документы, применяемые в электромеханике, которые определяют требования к проведению измерений, калибровке и поверке приборов, а также к разработке методов измерений и средств измерений.

1. ГОСТ Р ИСО 17025–2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» определяет требования к компетентности лабораторий, включая требования к оборудованию, процедурам измерений и контроля качества.

2. ГОСТ Р 8.563–2014 «Единицы физических величин и их обозначения» определяет единицы физических величин и их обозначения, которые используются в электромеханике.

3. ГОСТ Р 8.568–2015 «Единицы величин электрических и магнитных величин. Обозначения» определяет единицы величин электрических и магнитных величин и их обозначения.

4. ГОСТ Р 8.572–2016 «Точность измерений» определяет требования к точности измерений и методы ее оценки.

5. ГОСТ 8.586–2013 «Единицы величин электрических величин и токов в системах электроснабжения» определяет единицы величин электрических величин и токов, используемых в системах электроснабжения.

6. ГОСТ Р ИСО 10012–2015 «Системы управления измерениями. Требования к процессам измерений и оборудованию» определяет требования к системам управления измерениями, включая процессы измерений и оборудование.

7. ГОСТ Р 8.609–2006 «Калибровка измерительных приборов и вспомогательного оборудования» определяет требования к калибровке измерительных приборов и вспомогательного оборудования.

Таким образом, метрологическое обеспечение является необходимым элементом для обеспечения точности и надежности результатов измерений в электромеханике, а также для обеспечения соответствия продукции требованиям стандартов и нормативных документов, повышения эффективности производства и научных исследований.

Библиографический список

1. Chabanenko A. V., Yastrebov A. P. Quality Assurance of Hull Elements of Radio-Electronic Equipment by Means of Control System // J. Phys.: Conf. Ser. 1515. 2018. 052065.

2. Касьянов С. В., Новиков В. А., Ямалиева Р. А. Метрологическое обеспечение в системе постоянного улучшения качества // Компетентность. 2022. № 5. С. 24–27.

УДК 004.89:656. 073.28

Е. Е. Соловьева*
старший преподаватель
Т. Е. Маликова**
доктор технических наук, доцент
*Дальневосточный государственный технический
рыбохозяйственный университет
**Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ДЕЙСТВИЯМИ ПОГРУЗЧИКА ПРИ ВЫБОРКЕ КОНТЕЙНЕРОВ ИЗ ОПЕРАЦИОННОГО ШТАБЕЛЯ МОРСКОГО ТЕРМИНАЛА

Предложена компьютеризированная система управления технологическими операциями в зоне хранения контейнерного терминала, построенная на принципах работы технологического автомата. Алгоритм работы системы реализован автоматом Мили, генерирующим последовательности сигналов (кодов), в которой каждый символ кода соответствует некоторому действию из рабочего цикла перегружателя. Посредством последовательности кодированных символов реализована функция управления действиями погрузчика при селективном поиске и выемке целевых контейнеров из штабеля временного хранения.
Ключевые слова: терминал, производственные процессы, рабочий цикл, перегрузочное оборудование, технологический автомат, контейнер.

E. E. Solovieva*
Senior Lecturer
T. E. Malikova**
Dr. Sc., Tech., Associate Professor
*Far Eastern State Technical Fisheries University
**Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy

THE ALGORITHM FOR CONTROLLING THE LOADER OPERATIONS WHEN SELECTING CONTAINERS FROM THE MARINE TERMINAL OPERATIONAL STACK

Technological operations computerized control system in the container terminal storage area is presented based on the operational principles of a technological automaton. The algorithm of the system operation is implemented by the Mile automaton, generating the sequences of signals (codes) where each code symbol corresponds to some action from the loader working cycle. The function of the loader controlling operations during the selective search and removal of target containers from the temporary storage stack has been implemented by means of a sequence of coded symbols.
Keywords: terminal, production processes, operation cycle, cargo handling gear, technological automaton, container.

В операционных штабелях контейнерного терминала одновременно хранятся десятки тысяч контейнеров в ожидании выполнения с ними дальнейших действий (технологических операций), таких как погрузка на транспортное средство, выдача грузополучателю, внутритерминальные перемещения с одних технологических участков на другие, выполнение обязательных для импортных

грузов таможенных операций [1; 2] и т. д. Для экономии площади зоны хранения контейнеры складируются в штабели, допустимая ярусность которых зависит от технических характеристик применяемых контейнерных перегружателей и допустимых нагрузок на складскую площадь. Для сокращения времени простоя судов под грузовыми операциями в процессе выгрузки с борта контейнера могут размещаются в зоне хранения по методу свободных мест (в заранее определенные для них свободные ячейки) без учета последующих операций с ними, что в дальнейшем увеличивает трудоемкость выборки контейнеров из операционного штабеля [3; 4].

Контейнеры, которые должны быть вынуты в определенный момент времени для совершения последующих технологических операций с ними, так называемые целевые контейнеры, расположены в определенных ячейках штабеля. Зададим последовательность координат местоположения контейнера в штабеле как тройку переменных (i, j, k), где i – координата продольного ряда, j – координата яруса штабеля, k – координата поперечного ряда (рис. 1, *а*). Для выполнения операции выемки целевого контейнера необходимо расформировать стек, его (контейнер) содержащий, т. е. снять контейнеры, лежащие сверху на целевом (блокирующие контейнеры). Кроме того, стек с целевым контейнером в свою очередь может быть заблокирован стеком расположенном перед ним, как показано на рис. 1, *б*, например стек из продольного ряда с номером 2. В этом случае все контейнеры, находящиеся в блокирующем стеке, также должны быть предварительно убраны для открытия доступа погрузчику к стеку с целевым контейнером. После изъятия целевых контейнеров из штабеля, блокирующие их контейнеры должны быть возращены в стеки, в которых они находились первоначально. Всеми операциями выборке контейнеров из операционного штабеля управляет компьютеризированная система.

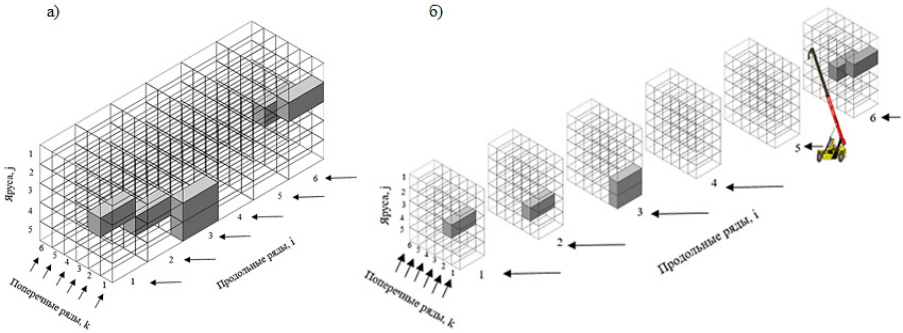
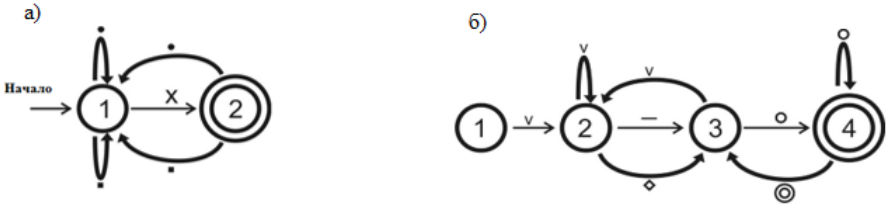


Рис. 1. Операционный штабель: а – определение местоположения контейнеров, координаты (i, j, k); б – пример расположения целевых контейнеров в продольных рядах

Система построена на принципах работы технологического автомата. В качестве технологического оборудования используется погрузчик, в частном случае ричстакер. Управление действиями погрузчика при выемке целевых

контейнеров из операционного штабеля осуществляется извне с использованием управляющей программы, алгоритм работы которой реализован на языке детерминированного конечного автомата Мили (рис. 2) [5; 6]. Критерий выбора оптимальной последовательности выемки заявленных контейнеров из штабеля – минимально возможное количество перемещений погрузчика вдоль продольных рядов штабеля (критерий расстояния).



•	Перемещение на один ряд вправо	v	Снятие контейнера
■	Перемещение на один ряд влево	–	Вывоз целевого контейнера во вспомогательный штабель
×	Остановка для выемки контейнеров из продольного ряда	○	Возврат блокирующего контейнера в исходный стек
		◊	Перемещение на один шаг в глубь штабеля
		◎	Перемещение на один стек назад

Рис. 2. Диаграммы переходов технологического автомата: а – вдоль продольных рядов штабеля; б – выемки целевых контейнеров из каждого продольного ряда

Алгоритм управления действиями погрузчика.

1. В систему управления поступает заявка, в которой перечислены контейнеры, подлежащие изъятию из операционного штабеля. Например, в заявке их шесть и их расположение в штабеле показано серым цветом (см. рис. 1).

2. Поступившая заявка обрабатывается в базе данных контейнерного терминала, в результате определяется местоположение целевых контейнеров в операционном штабеле, иными словами, каждый контейнер из заявки идентифицируется с принадлежащим ему адресом расположения в формате (i, j, k), где i – координата продольного ряда, j – координата яруса штабеля, k – координата поперечного ряда. Формируется множество Z $\{(i, j, k)\}$. Для рассматриваемого примера множество Z {(1, 3, 2); (2, 4, 2); (3, 4, 1); (3, 5, 1); (6, 2, 1); (6, 3, 3)}.

3. По внешним каналам связи запрашивается у оператора погрузчика текущие местоположение перегружателя. Ответ на запрос формируется в виде порядкового номера продольного ряда, возле которого на данный момент находится ричстакер, т. е. в управляющую систему с внешнего канала связи поступает i – координата из формата (i, j, k), однозначно определяющая как началь-

ное положение самого погрузчика возле штабеля, так и начальное состояние q_0 системы управляющих воздействий (автомата Мили). Для рассматриваемого примера (см. рис. 1, *б*) $i = 5$.

4. Определяются порядковые номера продольных рядов штабеля, из которых требуется достать целевые контейнеры. На порядковый номер нужного продольного ряда указывает первая координата адреса (i, j, k) каждого целевого контейнера из множества Z. Из множества I всех первых координат адресов составляем подмножество $\{i_0\}$ неповторяющихся номеров. Подмножество $\{i_0\}$ однозначно определяет порядковые номера продольных рядов штабеля, возле которых погрузчик должен совершить остановку в процессе своего движения вдоль штабеля для выполнения последовательности действий по выемке целевых контейнеров. Иначе говоря, просматриваем i-ю координату во множестве Z {(1, 3, 2); (2, 4, 2); (3, 4, 1); (3, 5, 1); (6, 2, 1); (6, 3, 3)} и составляем подмножество i_0 неповторяющихся номеров первой координаты адресов. Множество первых координат I {1; 2; 3; 3; 6; 6} → {1; 2; 3; 6}.

5. Находим оптимальную последовательность перемещений погрузчика вдоль продольных рядов штабеля, т. е. множество номеров {1; 2; 3; 6} переписываем в виде упорядоченной последовательности – очередности технологических остановок для выемки целевых и блокирующих контейнеров в приоритетном порядке. Для этого посредством диаграммы переходов (см. рис. 2, *а*) генерируем множество допустимых строк, которые принимает автомат (табл. 1). В табл. 1 строка минимальной длины, равной 10 символам, задает оптимальную последовательность перемещений погрузчика вдоль продольных рядов штабеля, т. е. множество номеров {1; 2; 3; 6} → {6; 3; 2; 1}.

Таблица 1

Поиск оптимальной последовательности перемещений погрузчика вдоль продольных рядов штабеля

Допустимая строка	Длина	Остановки	Допустимая строка	Длина	Остановки
•×■■■ × ■ × ■ ×	10	6; 3; 2; 1	■■ × ■ × ■ ×• • • • • ×	13	3; 2; 1; 6
•× ■■■■■ × ■ × ■ ×	12	6; 1; 2; 3	■■■ × ■ ×• •× • • • ×	13	2; 1; 3; 6
•× ■■■■ × ■ ×• • ×	12	6; 2; 1; 3	■■■■ ×•×•×• • • ×	13	1; 2; 3; 6

6. Группируем адреса целевых контейнеров по принципу принадлежности к определенному продольному раду. Первая i-я координата в адресе (i, j, k) расположения целевого контейнера однозначно определяет его принадлежность к тому или иному продольному ряду. Множество адресов Z разбивается на непересекающиеся подмножества по i-й координате. Таким образом формируются подмноже-

ства Z_i $\{(i, j, k)\}$ групп контейнеров, извлекаемых из продольных рядов в последовательности обхода этих рядов, определенной в п. 5. Для рассматриваемого примера из множества Z {(1, 3, 2); (2, 4, 2); (3, 4, 1); (3, 5, 1); (6, 2, 1); (6, 3, 3)} согласно последовательности {6; 3; 2; 1} получим следующие подмножества Z_6 {(6, 2, 1); (6, 3, 3)}, Z_3 {(3, 4, 1); (3, 5, 1)}, Z_2 {(2, 4, 2)}, Z_1 {(1, 3, 2)}.

7. Для каждого из четырех подмножеств Z_i с помощью автомата Мили (диаграмма переходов на рис. 2, *б*) генерируются строки управления действиями погрузчика при выемке целевых контейнеров из каждого продольного ряда. Например, строка управления для шестого ряда (множество Z_6 {(6, 2, 1); (6, 3, 3)}) показана в табл. 2. Для остальных множеств Z_3 {(3, 4, 1); (3, 5, 1)}, Z_2 {(2, 4, 2)}, Z_1 {(1, 3, 2)} строки управления генерируются аналогично.

Таблица 2

Информационный обмен между управляющей системой и погрузчиком при выемке целевых контейнеров из шестого продольного ряда

Строка символов управления						
v	v -	v v v	◊	v v v v v v	◊	v v
Снятие блокирующего контейнера в первом стеке	Снятие и вывоз целевого контейнера с координатами (6, 2, 1)	Снятие контейнеров, блокирующих второй стек	Перемещение погрузчика на один шаг в глубь штабеля	Снятие пяти контейнеров, блокирующих третий стек	Перемещение погрузчика на один шаг в глубь штабеля	Снятие блокирующих контейнеров в третьем стеке
Строка символов управления						
v -	○ ○	⊙	○ ○ ○ ○ ○	⊙	○ ○ ○ ○	
Снятие и вывоз целевого контейнера с координатами (6, 3, 3)	Возврат блокирующих контейнеров в третий стек	Перемещение погрузчика на один стек назад	Возврат блокирующих контейнеров во второй стек	Перемещение погрузчика на один стек назад	Возврат блокирующих контейнеров во второй стек	Работа с шестым продольным рядом окончена

В результате работы двух автоматов Мили (см. рис. 2) сгенерированы строка символов (сигналов), задающих последовательность перемещений погрузчика вдоль продольных рядов штабеля с остановками возле некоторых из них (выделена в табл. 1 серым цветом), а также строки символов (сигналов), задающих последовательность действий погрузчика по выемке контейнеров на каждой такой остановке. В совокупности эти строки задают последовательность сигналов управления действиями погрузчика при выборке целевых контейнеров из операционного штабеля морского терминала.

Библиографический список

1. Маликова Т. Е., Янченко А. А., Вольнов И. Н. Модель массового обслуживания импортного грузопотока с применением технологии предварительно-

ного информирования // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2017. Т. 9, № 2. С. 280–287.

2. Маликова Т. Е., Филиппова А. И. Разработка системы слежения за импортными грузопотоками, оформляемыми по технологии предварительного информирования в морском пункте пропуска // Морские интеллектуальные технологии. 2016. № 4-2 (34). С. 32–36.

3. Кузнецов А. Л., Семенов А. Д., Радченко А. А. Селективность контейнеров в различных транспортно-технологических схемах // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2020. Т. 12, № 4. С. 672–682.

4. Соловьева Е. Е. Оптимизация работы тыловых грузовых фронтов морских контейнерных терминалов: технологический аспект // Актуальные проблемы развития судоходства и транспорта: матер. Нац. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Владивосток, 16–17 нояб. 2022 г. Владивосток, 2022. С. 146–153.

5. Маликова Т. Е., Соловьева Е. Е., Радочинская А. Ж. Детерминированный конечный автомат поиска контейнеров в штабеле // Эксплуатация морского транспорта. 2022. № 4 (105). С. 91–100.

6. Radochinskaia A. Z., A. Y. Malikova, Strelkov T. E. Provability of dangerous goods segregation algorithm description using finite state-machine description language // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2021, Saint-Petersburg, 31 мая – 04 июня 2021 г. SPb., 2021. P. 9470722.

УДК 623.746.-519

А. Ю. Федоринов*
аспирант
В. В. Карпенко*
аспирант
С. Г. Бурлуцкий*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ПРОВЕДЕНИЕ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСОВ С БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

При выполнении поисково-спасательных работ с применением комплексов с беспилотными летательными аппаратами (КБПЛА) возникает необходимость решения ряда задач, таких как: поиск, наблюдение и маркировка объектов. Каждая из этих задач характеризуется и формализуется отдельными подзадачами, требующими особого внимания и выделения ключевых аспектов для успешного решения.
Ключевые слова: комплексы беспилотных летательных аппаратов, способы обнаружения целей, современные подходы к поисково-спасательным работам.

A. Yu. Fedorinov*
PhD Student
V. V. Karpenko *
PhD Student
S. G. Burlutsky*
PhD, Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SEARCH AND RESCUE OPERATIONS USING UAV COMPLEXES

When performing search and rescue operations using complexes with unmanned aerial vehicles, it becomes necessary to solve a number of tasks, such as: search, observation and marking of objects. Each of these tasks is characterized and formalized by separate subtasks that require special attention and highlighting key aspects for a successful solution.
Keywords: complexes of unmanned aerial vehicles, methods of target detection, modern approaches to search and rescue operations.

Введение

Рассмотрим детально каждый из шагов для успешного выполнения поисково-спасательной миссии.

1. Выполнение поиска.

Поиск объектов беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) может осуществлять следующими способами [1]:

а) применение пассивных средств поиска (оптико-электронные системы). Для увеличения дальности обнаружения полет может выполняться на больших высотах;

б) комплексное применение оптико-электронных (ОЭС) и радиолокационных систем (РЛС). В этом случае обеспечивается упреждение в обнаружении кораблей, терпящих бедствие. РЛС БПЛА при работе в круговом режиме повышает эффективность поиска и позволяет обнаруживать места крушений, корабли терпящие бедствия, не имеющие или с вышедшими из строя аварийными радиомаяками.

Для определения места кораблей, терпящих бедствие, обнаруженных с помощью аварийного радиомаяка, применяют следующие способы:

– последовательное пеленгование работающего маяка корабля из нескольких точек маршрута. Разница между измеренными пеленгами должна быть не меньше 30°;

– определение места корабля путем измерения величины изменения пеленга на цель за короткий промежуток времени. Сущность способа состоит в том, что в течение короткого промежутка времени (1–2 мин) с помощью пеленгации определяются два курсовых угла на работающий маяк корабля. Далее рассчитываются и отображаются на автоматизированном рабочем месте (АРМ) оператора дистанция до корабля и пеленг;

– определение места корабля замером траверзов. Способ основан на возможности наблюдать на экране АРМ изменение величины сигнала маяка при приближении или удалении БПЛА от корабля. Максимальный сигнал будет при наименьшем удалении корабля от БПЛА, т. е. в момент нахождения корабля на траверзе <KF. Замер траверзов на двух-трех участках маршрута БПЛА позволяет получить место корабля.

После обнаружения объектов, особенно при поиске и определении их места с помощью пеленга аварийного радиомаяка, БПЛА могут решать задачу их опознавания или уточнения места сближением на дальность радиолокационного, оптического или визуального контакта [2].

Сближение с кораблями на дальность оптического, визуального или радиолокационного контакта выполняется со снижением под зону обнаружения корабельной РЛС и переходом на полет на предельно малых высотах (30–60 м). В последующем на расчетном удалении от кораблей БПЛА с целью увеличения дальности обнаружения на короткое время набирает высоту (выполняет «горку») и после наблюдения объекта с помощью ОЭС визуально или с помощью РЛС со снижением уходит от него.

2. Наблюдение.

Наблюдение за местами крушения и происшествий может производиться с применением РЛС, ОЭС, а также визуально. В зависимости от поставленной задачи и способа поддержания контакта с терпящими бедствие наблюдение может быть непрерывным и периодическим [3].

При непрерывном наблюдении БПЛА все время находится в районе, постоянно поддерживая контакт избранными средствами или визуально. Непре-

рывное наблюдение применяется при необходимости контролировать ситуацию.

При периодическом наблюдении БПЛА выходят на контакт через заранее установленные промежутки времени. Периодичность наблюдения устанавливается исходя из требуемой частоты получения данных о текущей обстановке, общего времени наблюдения, наличия иных спасательных отрядов в районе и характера происшествия. В общем случае допускаются такие перерывы в наблюдении, за время которых обломки, дрейфующие суда, а также решающие факторы не успевают изменить место пребывания под воздействием окружающей среды от места их первоначального обнаружения на расстояние, превышающее дальность действия средств обнаружения БПЛА [4]. При наблюдении за тихоходными объектами в открытых районах, дрейфующими либо неподвижными объектами, находящимися на суше, возможны и более длительные перерывы в наблюдении. Однако предельная их величина должна быть такой, чтобы БПЛА при повторном вылете мог достоверно обнаружить объект за время своего нахождения в районе [5].

Выявление групп объектов выполняется с помощью РЛС, ОЭС и визуальным наблюдением. Возможности экипажей БПЛА по дальности визуального обнаружения (без применения оптических средств) объектов в море и определению их класса и курса в зависимости от условий видимости приведены в таблице.

Средние дальности визуального обнаружения и определения класса и курса кораблей

Объект	Условия видимости		
	Ясный солнечный день	Сплошная облачность на высоте 1,5–2 км	Сплошная низкая облачность
Обнаружение объекта, км			
Кр. суда	30–40	15–25	6–10
М. суда	15–25	10–15	3–5
Определение класса судна, км			
Кр. суда	15–20	10–15	6–10
М. суда	8–10	5–7	2–3
Определение курса судна, км			
Кр. суда	10–15	6–10	4–6
М. суда	8–10	4–8	3–4

3. Маркировка.

В ходе маркировки БПЛА, наблюдая объекты непрерывно или периодически, выводит спасательные силы избранными способами в заранее определенную позицию относительно объекта спасения или на дальность обнаружения его средствами наблюдения спасательной группы. Например, авиация МЧС России может выводиться в зону развертывания, место которой относительно объекта устанавливается предварительно, или непосредственно на объект спасения на дальность обнаружения объекта бортовыми РЛС авиации.

Наведение БПЛА спасательных сил (самолетов (вертолетов), надводных кораблей) исходя из конкретных условий обстановки может осуществляться следующими основными способами: радиодонесением, пеленгованием БПЛА, с помощью ориентирных средств, радиоприводом и комбинированным применением различных способов [6].

Наведение радиодонесением является наиболее распространенным способом при действиях в удаленных районах моря. Его сущность заключается в том, что БПЛА передает необходимые разведывательные данные об объекте спасения по радио в установленном порядке в адрес управления спасательной операцией. Объем и порядок передачи данных из района указывается оператору БПЛА перед вылетом. Кроме того, как правило, донесение передается немедленно, если существует вероятность увеличения масштабов действия или площади территории проведения спасательной операции.

Маркировка пеленгованием БПЛА, находящегося в районе и подающего короткие сигналы на установленных частотах, осуществляется управлением по известным координатам БПЛА, получаемым от береговых радиопеленгаторов или РЛС. Вспомогательные силы могут выходить на цель и самостоятельно, пеленгуя БПЛА собственными средствами (например, спасательные суда с помощью радиопеленгаторов или РЛС) [7].

Наведение с помощью ориентирных средств применяется в условиях достаточной визуальной видимости сигналов днем и ночью, а при использовании дипольных отражателей в качестве ориентирных средств – в любых условиях видимости. Этот способ используется в основном для наведения авиации. БПЛА в целях обозначения зон развертывания спасательных групп авиации или направления полета на место крушения может применять светящие неуправляемые авиационные ракеты (дальность видимости до 100–150 км), ориентирные морские бомбы (дальность видимости до 30–50 км), дипольные отражатели (дальность обнаружения облака отражателей бортовой РЛС до 200–250 км, корабельной РЛС – до 300 км и более).

Наведение способом радиопривода используется главным образом для авиации. При этом могут применяться вертолетные радиостанции и аппаратура опознавания. Сущность наведения с применением вертолетных радиостанций и аппаратуры опознавания заключается в том, что БПЛА, находясь в районе цели, включает радиостанцию или вертолетный ответчик, а авиационные ударные группы с помощью автоматических радиокомпасов или запросчиков, пеленгуя БПЛА, выходят на него как на приводную радиостанцию. Выход на привод с помощью автоматических радиокомпасов возможен с удалений до 300 км. Подача сигнала БПЛА производится по приказанию управлением спасательными силами.

Библиографический список

1. Просвирина Н. В. Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов // Московский экономический журнал. 2021. № 10. URL:

https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-perspektivy-razvitiya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov (дата обращения: 11.04.2023).

2. Вэй Ян Лвин. Алгоритмы работы многофункционального комплекса БПЛА // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2014. № 10. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/algoritmy-raboty-mnogofunktsionalnogo-kompleksa-bpla (дата обращения: 11.04.2023).

3. Жужгов Ю. В., Калач Е. В. Краткая характеристика БПЛА, применяемых для проведения воздушного мониторинга объектов нефтегазового комплекса // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. № 9. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kratkaya-harakteristika-bpla-primenyaemyh-dlya-provedeniya-vozdushnogo-monitoringa-obektov-neftegazovogo-kompleksa (дата обращения: 11.04.2023).

4. Применение программно-аппаратного комплекса на базе БПЛА для решения задач оперативного мониторинга ООПТ / А. Е. Илюхин, К. Д. Бухаров, Д. В. Добрынин [и др.] // Труды Мордовского государственного природного заповедника им. П. Г. Смидовича. 2022. № 30. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-programmno-apparatnogo-kompleksa-na-baze-bpla-dlya-resheniya-zadach-operativnogo-monitoringa-oopt (дата обращения: 11.04.2023).

5. Абдулов Р. Н., Абдуллаев Н. А., Асадов Х. Г. Вопросы оптимизации применения беспилотных летательных аппаратов для поиска и слежения объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 1 (83). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/voprosy-optimizatsii-primeneniya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-dlya-poiska-i-slezheniya-obektov (дата обращения: 11.04.2023).

6. Пчелин И. Л., Нартов Е. А. Разработка БПЛА для поисково-спасательных операций и переброски грузов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. № 9. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-bpla-dlya-poiskovo-spasatelnyh-operatsiy-i-perebroski-gruzov (дата обращения: 11.04.2023).

7. Федосеева Н. А., Загвоздкин М. В. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов // Научный журнал. 2017. № 9 (22). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-oblasti-primeneniya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov (дата обращения: 11.04.2023).

УДК 54.08

А. В. Чабаненко*
кандидат технических наук, доцент
Д. Ф. Казадио*
студент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ЦИФРОВОЙ КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ

Рассмотрен цифровой контроль геометрических параметров, который является важной частью процесса производства в электромеханической индустрии. Он позволяет точно измерять размеры, формы и положения различных деталей и компонентов, что необходимо для обеспечения качества и надежности конечных изделий. После получения данных о геометрических параметрах происходят их анализ и сравнение с требуемыми спецификациями. Если параметры не соответствуют требованиям, то производятся корректировка и повторный контроль. Это позволяет обеспечить соответствие изделий заданным требованиям к качеству и гарантировать их надежную работу в условиях эксплуатации.
Ключевые слова: цифровой контроль, индустрия 4.0, геометрические параметры, качество.

A. V. Chabanenko*
PhD, Tech., Associate Professor
D. F. Kazadio*
Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DIGITAL CONTROL OF GEOMETRIC PARAMETERS IN ELECTROMECHANICS

The article deals with the digital control of geometric parameters, which is an important part of the production process in the electromechanical industry. It allows you to accurately measure the dimensions, shapes and positions of various parts and components, which is necessary to ensure the quality and reliability of final products. After receiving the data on the geometric parameters, they are analyzed and compared with the required specifications. If the parameters do not meet the requirements, then an adjustment and re-control is made. This allows you to ensure that products meet the specified quality requirements and guarantee their reliable operation in operating conditions.
Keywords: digital control, industry 4.0, geometric parameters, quality.

Введение

Цифровой контроль геометрических параметров в электромеханике – это процесс использования компьютерного оборудования и программного обеспечения для измерения и анализа геометрических параметров электромеханических компонентов и устройств. Такой контроль может использоваться для тестирования качества продукции на различных этапах производства, включая проверку размеров, формы, расположения и выравнивания элементов. Такой вид контроля может быть полезен во многих областях электромеханики, таких

как производство электронных устройств, сборка моторов, проверка геометрии турбин и т. д.

Указанный контроль может быть осуществлен с помощью различных инструментов, включая координатно-измерительные машины (КИМ), сканирующие системы и лазерные технологии. Эти инструменты могут использоваться в сочетании с программным обеспечением для создания трехмерных моделей объектов и анализа полученных данных. Кроме того, цифровой контроль геометрических параметров позволяет повысить точность измерений и уменьшить человеческий фактор при измерении параметров. Также он позволяет ускорить процесс контроля и увеличить его объемность, что особенно важно при производстве большого количества продукции.

Роль цифрового контроля в производстве

Цифровой контроль геометрических параметров также может быть полезен для определения причин дефектов в продукции и предотвращения их возникновения в будущем. Например, если при контроле геометрических параметров выявляется неправильная форма или размер компонента, можно провести дополнительные исследования, чтобы определить причину этого дефекта и предпринять меры для его устранения.

Для проведения цифрового контроля геометрических параметров в области электромеханики используются различные виды специального оборудования, которое позволяет производить точные и надежные измерения параметров компонентов и устройств. Некоторые из основных видов оборудования для цифрового контроля геометрических параметров в электромеханике включают [1]:

КИМ стационарный

1) 3D-сканеры. Это специальные устройства, которые используются для сканирования и создания 3D-моделей компонентов и устройств. Они могут измерять различные параметры, такие как размеры, форма, поверхностные дефекты и т. д.;

2) координатно-измерительные машины (КИМ). КИМы используются для измерения параметров компонентов и устройств в трехмерном пространстве. Они обычно имеют высокую точность измерений и могут использоваться для измерения микрометрических параметров (рисунок);

3) оптические средства контроля. Оптические системы могут использоваться для измерения параметров компонентов и устройств на основе оптической интерференции или дифракции. Они обычно имеют высокую точность измерений и могут использоваться для измерения различных параметров, таких как высота, ширина, глубина и т. д.;

4) контрольно-измерительные приборы. Это могут быть различные инструменты для измерения геометрических параметров, такие как штангенциркули, микрометры, нутромеры, штангенблоки и т. д. Они обычно имеют более низкую точность, чем другие виды оборудования, но могут использоваться для измерения микрометрических параметров;

5) специальное программное обеспечение. Для обработки и анализа полученных данных используется специальное программное обеспечение. Оно может применяться для создания 3D-моделей, анализа поверхностных дефектов, определения точности измерений и т. д. В зависимости от требований производства и характеристик компонентов и устройств, могут использоваться различные комбинации этих видов оборудования и программного обеспечения для проведения цифрового контроля геометрических параметров.

Однако при использовании цифрового контроля геометрических параметров необходимо учитывать его ограничения и недостатки. Например, сканирующие системы могут иметь ограничения в разрешении или диапазоне измерения, что может привести к неточности измерений. Также необходимо обеспечить правильную калибровку и обслуживание оборудования, чтобы гарантировать точность измерений и надежность данных [2].

Хотя цифровой контроль геометрических параметров в электромеханике имеет много преимуществ, он также имеет некоторые недостатки.

1. Высокая стоимость оборудования и программного обеспечения. Оборудование для цифрового контроля геометрических параметров в электромеханике, а также программное обеспечение для обработки полученных данных могут быть очень дорогими. Это может ограничивать доступность данного метода контроля для некоторых предприятий и организаций.

2. Требуется обучение операторов. Для использования оборудования и программного обеспечения для цифрового контроля геометрических параметров требуется обучение. Операторы должны иметь знания в области измерительной техники, технической графики, компьютерной графики и т. д. Это может потребовать дополнительных затрат на обучение персонала.

3. Невозможность измерения некоторых параметров. Некоторые параметры компонентов и устройств могут быть сложными для измерения с помощью цифровых средств контроля. Например, измерение механических свойств, таких как твердость и прочность материалов, может требовать специальных методов и оборудования.

4. Невозможность обнаружения скрытых дефектов. Цифровой контроль геометрических параметров может помочь обнаружить поверхностные дефекты, но не всегда способен выявить скрытые дефекты, такие как трещины внутри материала. Для их обнаружения могут потребоваться дополнительные методы контроля.

5. Возможность ошибок. При использовании цифровых средств контроля возможны ошибки, связанные с неправильным выбором параметров измерения, калибровкой оборудования, анализом данных и т. д. Это может привести к неточным результатам и ошибкам в производственном процессе.

Перспективы цифрового контроля геометрических параметров в электромеханике связаны с развитием технологий и увеличением доступности средств контроля. С развитием технологий и материалов появляются новые возможности для создания более точного и универсального оборудования для цифрового контроля геометрических параметров. Например, использование лазерных сканеров и томографов позволяет более точно и быстро проводить измерения. Современные программы для обработки данных позволяют проводить более сложные и точные анализы геометрических параметров компонентов и устройств. Развитие программного обеспечения для цифрового контроля геометрических параметров помогает сокращать время проведения измерений и анализа данных, увеличивая эффективность производства. Снижение стоимости оборудования и программного обеспечения для цифрового контроля геометрических параметров позволяет более широко использовать этот метод контроля в различных отраслях, улучшая качество и надежность продукции.

Также все это может быть использовано в рамках концепции «Индустрия 4.0», где с помощью цифровых технологий производственный процесс становится более автоматизированным и управляемым. В этом случае цифровой контроль геометрических параметров может использоваться в комплексе с другими технологиями, такими как интернет вещей, искусственный интеллект, облачные вычисления и т. д. Он может помочь снизить количество бракованной продукции, что в свою очередь уменьшит отходы и потребность в производстве новых компонентов, что может оказать положительный вклад в экологический аспект производства [3].

В целом цифровой контроль геометрических параметров – важный инструмент для обеспечения качества и эффективности производства в области электромеханики, и его использование может быть полезным для компаний, которые занимаются производством и сборкой электромеханических компонентов и устройств.

Библиографический список

1. Chabanenko A. V., Yastrebov A. P. Quality Assurance of Hull Elements of Radio-Electronic Equipment by Means of Control System // J. Phys.: Conf. Ser. 1515. 2018. 052065.

2. Шмитц Н., Новотный Д. Введение в электромеханику. М.: Мир, 1969.

3. Бутырин П. А., Алпатов М. Е. Цифровизация и аналитика в электротехнике. Цифровые двойники трансформаторов // Электричество. 2021. № 10. С. 4–10.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИТУАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ В ЭЛЕКТРОНИКЕ И ПРИБОРОСТРОЕНИИ

УДК 65.011.56

А. В. Винниченко*
старший преподаватель
В. М. Алексеев*
студент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТИПОВОГО АЛГОРИТМА ВНЕДРЕНИЯ ERP-СИСТЕМ

Работа посвящена исследованию развития ERP-систем, а также анализу трендов их внедрения на современных производствах. Рассмотрены возможные эффекты от внедрения систем планирования и организации производства, а также предложен типовой алгоритм по внедрению ERP-системы на предприятие.
Ключевые слова: ERP-системы, ретроспективный анализ, архитектура ERP ПО, алгоритм внедрения ERP-систем.

A. V. Vinnichenko*
Senior Lecturer
V. M. Alekseev*
Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A TYPICAL ALGORITHM FOR IMPLEMENTING ERP SYSTEMS

The paper is devoted to the study of the development of ERP systems, as well as the analysis of trends in their implementation in modern production facilities. The possible effects of the introduction of production planning and organization systems are considered, and a typical algorithm for the introduction of an ERP system to an enterprise is proposed.
Keywords: ERP systems, retrospective analysis, ERP software architecture, ERP systems implementation algorithm.

Введение

По мере экономического роста и развития у организаций различных уровней появляется необходимость в комплексных решениях информационных и коммуникационных технологий для эффективной реализации производственных задач. ERP-системы, позволяющие обеспечить автоматизацию бизнес-процессов с непрерывным доступом и возможностью получения актуальных данных производственного процесса, выполняют поставленные задачи.

Актуальность внедрения и использования ERP-систем в современных организациях заключается в нескольких аспектах: рост эффективности бизнес-процессов, обеспечение своевременной и точной информацией, увеличение прозрачности деятельности, сокращение издержек и повышение удовлетворен-

ности клиентов. Данные обстоятельства, имеющие необходимость по управлению процессами, в различных отраслях для сохранения конкурентоспособности на мировом рынке формируют положительный тренд развития ERP-систем [1; 2].

Материалы и методы

Ретроспективный анализ развития и внедрения ERP-систем включает период с начала их создания и внедрения до современности. Этот процесс можно условно разделить на несколько этапов [3].

1. Скрытый этап. В середине 1950-х гг. была разработана система планирования потребностей материалов(MRP), в 70-е с развитием вычислительной техники были разработаны и успешно внедрены в машиностроительную отрасль первые прототипы. Недостатками, затрудняющими вывод систем на промышленную арену XX в., являлись дороговизна, отсутствие единой структуры подразделений предприятия, а также громоздкость первых IBM-машин.

2. Этап зарождения. Первые ERP-системы появились в 80-х гг. прошлого века и были скорее прототипами, чем полноценными программными продуктами. Они предназначались для управления производством и логистикой и планирования производственных ресурсов (MRP II).

3. Этап развития. В 1990-х гг. произошел рост спроса на ERP-системы, которые обрели единую базу данных для сбора информации во всей компании. А также стали функционировать не только в производственной сфере, но и поддерживали и другие бизнес-функции, такие как бухгалтерия, продажи, инженерия и управление человеческими ресурсами (HR), чтобы служить единым источником точных данных для всех сотрудников.

4. Этап диверсификации. В начале 2000-х гг. на рынок вышло множество новых компаний-разработчиков ERP-систем, что привело к увеличению их разнообразия и специализации.

5. Этап интеграции. В последние годы ERP-системы интегрируются со сторонними приложениями, что позволяет более точно настраивать системы под нужды конкретной компании.

Системы планирования и организации производства улучшаются и изменяются по мере научного и технического прогресса. Можно выделить следующий зарождающийся этап развития: интеллектуальные ERP-системы (iERP-системы). Они позволяют оперативно и эффективно собирать и обрабатывать информацию из различных источников, составлять прогнозные модели и проводить управленческие эксперименты, благодаря чему руководству становится возможным принимать решения даже в режиме реального времени.

В современных условиях нестабильной экономической ситуации (рис. 1) [4] значительная часть организаций заинтересована в максимальной эффективности каждого структурного подразделения (рис. 2), следовательно, ставит целью максимизацию прибыли и оптимизации производственного процесса (рис. 3) [5]. На сегодняшний день ERP-системы применяются во многих отраслях, главным их потребителем является торговля (рис. 4) [6].

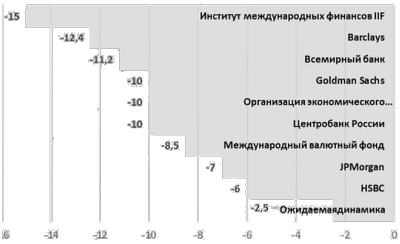


Рис. 1. Прогнозные данные по ВВП России

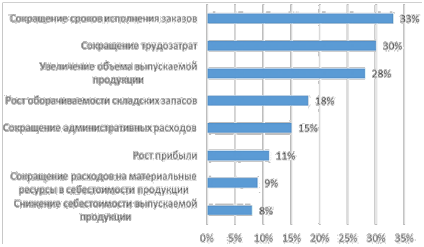


Рис. 2. Средние показатели эффекта от внедрения ERP

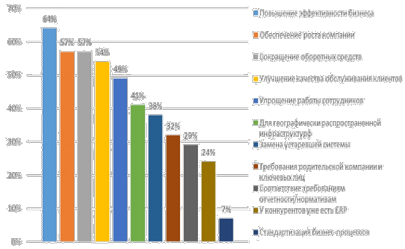


Рис. 3. Причины внедрения ERP на предприятии

Рис. 4. Процент внедрения ERP-системы в разных отраслях промышленности

При принятии решения о внедрении ERP-системы в организацию необходимо учитывать архитектуру (рис. 5) внедряемой ERP-системы, поскольку программное обеспечение состоит из отдельных самостоятельных модулей, которые могут покупаться и внедряться на предприятие независимо друг от друга, что может существенно повлиять на выбор конечной системы и ее интеграцию с существующими приложениями и инфраструктурой. Также нужно учитывать, что ERP-система должна соответствовать бизнес-процессам и требованиям предприятия. Одновременно с этим необходимо принять во внимание другие факторы, включающие возможность интеграции с другими системами и устройствами, стоимость внедрения и поддержки, а также безопасность и защиту данных. Необходимо провести подробный маркетинговый анализ трендов выбираемого ПО для уверенности в его качестве [7].

Традиционные ERP-системы способны эффективно управлять материальными, финансовыми, трудовыми и другими ресурсами предприятия, осуществлять их планирование, распределение и контроль. Особенность таких ERP-систем и их основное отличие от остальных программных продуктов, позволяющих осуществлять контроль процессов предприятия, заключаются в том, что они требовательны к выбору компании-поставщика, а также обладают длительным периодом внедрения.

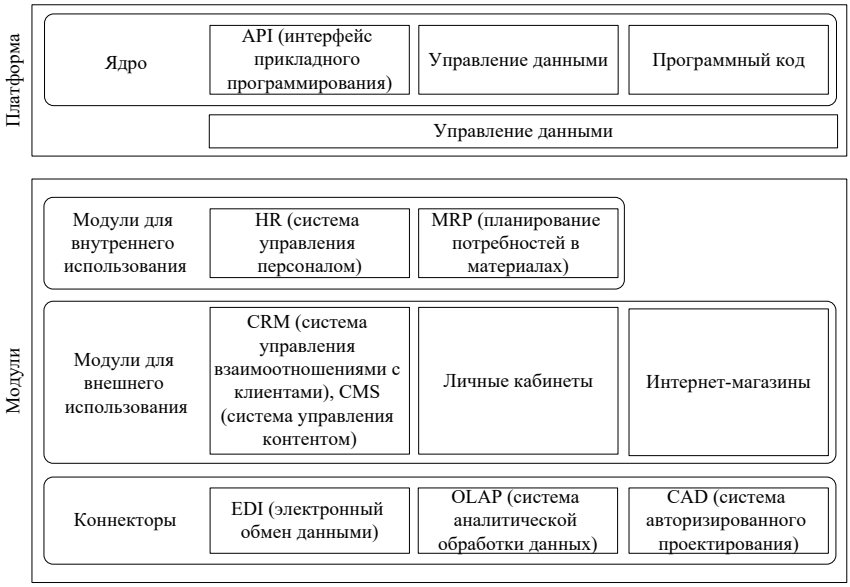


Рис. 5. Архитектура ERP-системы

Процесс внедрения ERP-системы – трудоемкий с длительным циклом приработки и требующий значительных затрат. Однако грамотно функционирующая ERP-система позволит автоматизировать многие рутинные операции, благодаря чему сотрудники смогут сконцентрироваться на более важных задачах, а процессы бизнеса станут более эффективными, также появится возможность получать информацию о производственных процессах, финансовом состоянии компании, клиентах и т. д. в режиме реального времени [8]. Благодаря этому руководство компании будет иметь возможность быстро принимать важные решения на основе актуальных данных и обеспечивать единый и систематизированный подход к учету бизнес-процессов, что повысит прозрачность и надежность учетных данных. Сокращение затрат за счет улучшения управления запасами, логистики, производственных процессов также позволит избежать необходимости покупать и поддерживать несколько несовместимых систем и оперативнее реагировать на запросы клиентов, обеспечивать высокий уровень их обслуживания и повышать удовлетворенности продуктом [9; 10].

Результаты

С учетом опыта отечественных организаций, внедривших ERP-системы, был разработан типовой алгоритм внедрения (рис. 6) с целью стандартизировать процедуру и сформировать единую последовательность действий.

Из разработанного алгоритма появляется четко структурированная последовательность действий. Необходимо проанализировать функциональность

и эффективность текущих бизнес-процессов, чтобы определить, каким образом ERP-система будет интегрироваться в существующую систему управления. Далее на основе оценки текущего состояния и стратегии развития предприятия определяются функциональные требования к ERP-системе. После определения требований проводится анализ рынка для выявления наиболее подходящих ERP-систем, которые соответствуют требованиям компании. Анализируются архитектуры выбранных ERP-систем и возможность их интеграции с существующими системами, если таковые в организации присутствуют. Определяются этапы проекта внедрения ERP-системы, ресурсы для его реализации и график работ.

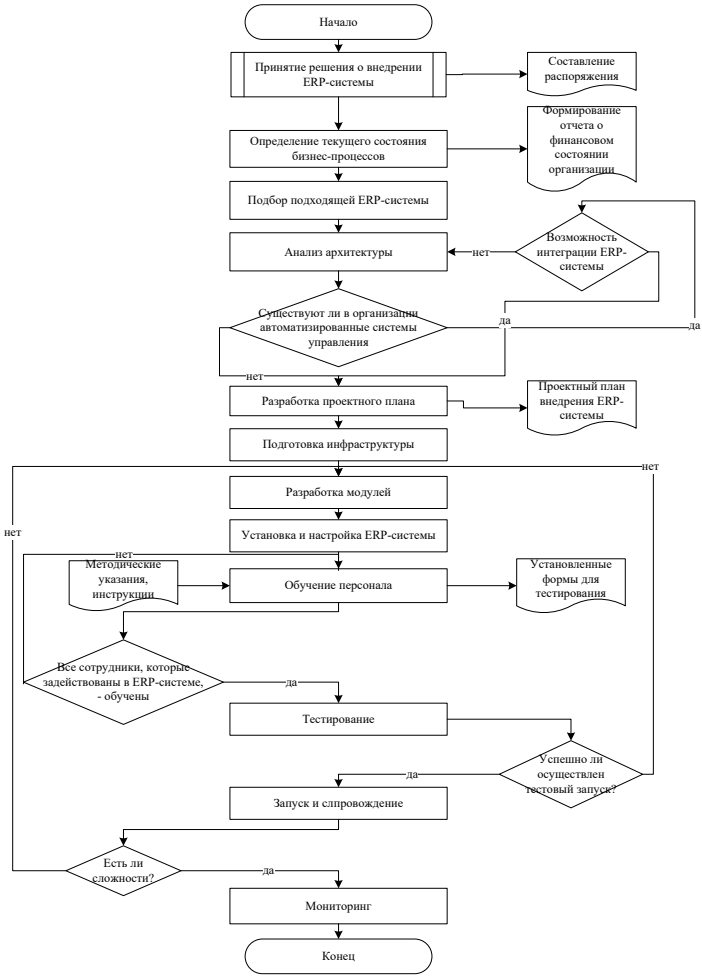


Рис. 6. Типовой алгоритм внедрения ERP-системы

Для успешного внедрения ERP-системы необходимо настроить соответствующие инфраструктуру, в том числе серверы, сети и базы данных. После настройки инфраструктуры и выбора подходящей ERP-системы начинается разработка необходимых модулей, которые наиболее точно отражают бизнес-процессы компании. После разработки модулей проводятся установка и настройка ERP-системы в соответствии с проектным планом. Перед запуском ERP-системы необходимо обучить персонал, который будет взаимодействовать с системой, чтобы обеспечить эффективную работу и минимизировать ошибки. После настройки и обучения персонала необходимо провести тестирование ERP-системы, чтобы проверить ее работоспособность и выявить возможные ошибки. После проведения всех мероприятий и успешного тестирования производится запуск ERP-системы и начинается ее сопровождение.

Заключение

Был проведен ретроспективный анализ ERP-систем, на основе которого выявлен положительный тренд современного развития систем планирования и организации производства. Также отметим актуальность проблематики внедрения ERP-систем из-за отсутствия стандартизированной документированной процедуры. Таким образом, с учетом положительной динамики внедрения ERP и прогнозных данных был разработан типовой алгоритм внедрения ERP-систем, включающий основные этапы реализации проекта по внедрению систем планирования и организации производства, который будет полезен для руководителей различных отраслей промышленности.

Библиографический список

1. Дурдыева Г. К., Нурыева О. Н. Роль информационных систем в управлении организацией XXI века // Вестник науки. 2023. № 1 (58). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rol-informatsionnyh-sistem-v-upravlenii-organizatsiey-xxi-veka (дата обращения: 22.03.2023).

2. Винниченко А. В. Комбинаторика цифровых решений для задач бережливого производства // Системный анализ и логистика. 2023. № 1 (35).

3. История возникновения ERP систем // Промышленная и экологическая безопасность, диагностирование и лабораторные исследования, консалтинг, инжиниринг и цифровизация. URL: https://giapdc.ru/istoriya-vozniknoveniya-erp-sistem/ (дата обращения: 22.03.2023).

4. Прогнозы не сработали: почему экономика России избежала крутого пике // РБК. Тренды. Инновации. URL: https://trends.rbc.ru/trends/innovation/63cfbb399a7947deef3400d8 (дата обращения: 22.03.2023).

5. Обеспечение безопасности ERP-систем SAP на примере решения SafeERPSuite // Anti-Malware.ru – информационная безопасность для профессионалов. URL: https://www.anti-malware.ru/practice/methods/security-of-erpsystems-on-example-safeerp-suite (дата обращения: 22.03.2023).

6. ERP // TAdviser: портал выбора технологий и поставщиков. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/ERP (дата обращения: 22.03.2023).

7. Голубева О. Л. Анализ функциональных возможностей современных erp-систем // Управление в современных системах. 2022. № 3 (35). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-funktsionalnyh-vozmozhnostey-sovremennyh-erp-sistem (дата обращения: 21.03.2023).

8. Шитова Т. Ф. ERP-система – эффективный инструмент развития цифровой экономики // Муниципалитет: экономика и управление. 2021. № 2 (35). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/erp-sistema-effektivnyy-instrument-razvitiya-tsifrovoy-ekonomiki (дата обращения: 20.03.2023).

9. Мировой рынок ERP-систем // JETINFO: ИТ-портал компании «ИнфосистемыДжет». URL: https://www.jetinfo.ru/mirovoj-rynok-erp-sistem/ (дата обращения: 20.03.2023).

10. Соломаха Д. А., Лушникова Н. В. Применение ERP-систем в России // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2013. № 2 (6). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-erp-sistem-v-rossii (дата обращения: 21.03.2023).

УДК 004.8

А. В. Винниченко*
старший преподаватель
Ю. П. Истомина*
студент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

АЛЬФА КРОНБАХА ДЛЯ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Проведен анализ надежности результатов прогнозирования разных моделей машинного обучения: линейная регрессия, лес решений и дерево решений – путем определения альфы Кронбаха, а также степень вариативности изменения для данных по объему инновационных товаров, работ, услуг и данных по инновационным товарам, работам и услугам, вновь внедренных или подвергавшихся значительным технологическим изменениям в течение последних трех лет.
Ключевые слова: альфа Кронбаха, надежность, машинное обучение, количественные данные, прогнозирование.

A. V. Vinnichenko*
Senior Lecturer
Yu. P. Istomina*
Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

CRONBACH'S ALPHA FOR RELIABILITY ANALYSIS IN PREDICTING MACHINE LEARNING MODELS

In the presented article, the possibility of using Cronbach's Alpha on quantitative data is considered. The reliability of forecasting results of different machine learning models is analyzed: linear regression, decision forest and decision tree, by determining the Cronbach Alpha, as well as the degree of variability of changes for data on the volume of innovative goods, works, services and data on innovative goods, works and services, newly introduced or subjected to significant technological changes over the past three years.
Keywords: Cronbach's Alpha, reliability, machine learning, quantitative data, forecasting.

Введение

Альфа Кронбаха – статистический метод оценки надежности измерений, который используется для проверки согласованности ответов на несколько вопросов или результатов нескольких тестов. В теории метод можно применять для оценки надежности результатов прогнозирования моделей машинного обучения на количественных данных [1; 2]. Однако перед применением альфы Кронбаха для проверки надежности прогнозов разных моделей машинного обучения необходимо убедиться, что данные соответствуют требованиям метода. В частности, альфа Кронбаха используется для проверки согласованности ответов на несколько вопросов или результатов нескольких тестов, поэтому

данные должны собираться из одной выборки и быть согласованными между собой. Кроме того, альфа Кронбаха подразумевает наличие категориальных данных, поэтому необходимо перевести количественные данные в категориальные. Например, можно определить границы интервалов значений и присвоить каждому интервалу уникальный код.

Материалы и методы

Выдвигается гипотеза, что возможность использования данного коэффициента присутствует и для оценки изменения количественных данных в изменении их за разный период времени или для оценки качества моделей прогнозирования [3; 4]. Альфа Кронбаха определяет согласованность, совпадение оценки нескольких экспертов при анкетировании. Аналогичным способом можно определить изменение количественных данных с течением времени при прогнозировании.

Для подтверждения гипотезы проведено определение альфы Кронбаха для трех баз данных – результатов прогнозирования трех моделей машинного обучения на одной обучающей выборке и для трех баз данных одного параметра с течением времени. При качественных моделях значения должны быть близкими друг другу, значит, альфа Кронбаха будет высокой.

```
import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.tree import DecisionTreeRegressor
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
from sklearn.metrics import r2_score

features_train= {'V':[10260.1,491.5,480.6,21732.2,213.6,651,3693061.6,603138.4,2995867, 272304.3,14149.4,3901.4,4915.8,390.2,144.4,14498.3,36599.1,11232.6,631765,184369.6,
                      27016.8,75850.7,35067.7,305030.9,195299.7,173269.6,62599.6,110684.1,496438,332660.5,3350.9,1959.9,2368.4,78929.6,15126.5]}
features_train=pd.DataFrame(data=features_train)

y_train= {'In':[8152.6,491.5,0.4,16211.2,213.6,512.1,2392416.2,231546.8,2077459.1,223993.3,10883.2,3901.4,4167,237.3,82.2,13737.9,18823.5,4933.7,367952.5,116171.5,
              16440.4,39120.7,21948.1,192789.8,94311,120875.7,37102.5,63821.8,462583.8,260552.4,377.5,1188.5,1463.5,69077.6,14332.6]}
features_test= {'V':[26356.7,846.7,88.2,40935.5,1047.5,284.5,3871481.1,663341,2986615.5,258561.5,16841.5,1274.8,5641.4,227.7,957.4,8238.9,31946.1,10795.4,516784.2,
                     159337.5,58728.5,73631.7,47266.6,336582.5,206604.6,186750.9,75653.8,99020.3,477300.8,384160.1,1464.2,2684.5,26160.6,202922.3,18602.2]}
y_test={'In':[20743.8,23.6,88.2,27587.1,842.1,284.4,2497693.1,220309.7,2070895.3,203739,12544,1274.8,5150.8,194.8,143.8,3366.1,8932.6,8592.4,347476.6,95284.4,
              56377,44047.2,36299.3,181959.2,161761.2,108849.8,42913.5,49658.2,373219.7,305956,326.6,2356.1,20472.1,192146,14342.1]}
y_train=pd.DataFrame(data =y_train)
features_test=pd.DataFrame(data=features_test)
y_test=pd.DataFrame(data =y_test)


model=LinearRegression()
model.fit(features_train, y_train)
pred=model.predict(features_test)
result= r2_score(y_test, pred)
print(np.round(pred,2))
print(result)

model_1 = DecisionTreeRegressor(random_state=12345,max_depth=10)
model_1.fit(features_train,y_train)
predictions_valid = model_1.predict(features_test)
result = r2_score(y_test,predictions_valid)
print( np.round(predictions_valid,2))
print(result)

model_2 =RandomForestRegressor(random_state=12345, n_estimators=100,max_depth=10)
model_2.fit(features_train,y_train)
predictions_valid_2 = model_2.predict(features_test)
result_2 = r2_score(y_test, predictions_valid_2)
print(np.round(predictions_valid_2,2))
print(result_2)
```

Код построения моделей

Для построения моделей машинного времени выбран язык программирования Python. Обучающая выборка взята с официального интернет-ресурса Федеральной службы государственной статистики [5]. Признаком для модели являются данные объема инновационных товаров, работ, услуг, в обучающую

выборку взяты данные объема инновационных товаров, работ, услуг за 2017 г., в тестовую выборку – данные объема инновационных товаров, работ, услуг за 2018 г. Целевым признаком для модели выступают данные инновационных товаров, работ, услуг, вновь внедренные или подвергавшиеся значительным технологическим изменениям в течение последних трех лет, в обучающую выборку взяты данные инновационных товаров, работ, услуг, вновь внедренные или подвергавшиеся значительным технологическим изменениям в течение последних трех лет за 2017 г., в тестовую – данные инновационных товаров, работ, услуг, вновь внедренных или подвергавшихся значительным технологическим изменениям в течение последних трех лет за 2018 г. Моделями машинного обучения выбраны: линейной регрессии, лес решений и дерево решений [6; 7]. Параметр «количество деревьев» леса решений составляет 10, «количество ветвей» – 100. Параметр «количество ветвей» дерева решений составило 100. Для определения качества отдельных моделей просчитывался коэффициент детерминации [8]. В итоге взяты результаты прогнозирования каждой модели, и альфа Кронбаха определяется между ними. Полный код построения моделей решений представлен на рисунке.

Структурированные данные результатов прогнозирования моделей машинного обучения показаны в табл. 1.

Таблица 1

Прогнозы моделей

Прогноз линейной регрессии		Прогноз дерева решений		Прогноз леса решений	
16728	6397,68	16440,4	4933,7	16988,9	6479,57
–207,01	342310	512,1	462583,8	488,57	383560
–711,56	105010,92	82,2	120875,7	139,75	115931
26406	38219,22	18823,5	37102,5	19696,9	38869,1
–73,7	48113,06	512,1	39120,7	488,57	44788,2
–580,02	30609,96	213,6	18823,5	207,85	21354,5
2569406	222679,27	2392416,2	260552,4	2153285	240822
439605	136390,32	367952,5	94311	340644	106010
1981967	123209,96	2077459,1	116171,5	2036751	114027
1708831	49455,48	223993,3	39120,7	210623	45688,1
1041153	64967,9	14332,6	63821,8	13932	61046,8
77,2	316098,5	512,1	462583,8	633,85	376042
2976,07	254264,8	4167	260552,4	3770,17	240822
–617,94	202,94	213,6	1188,5	187,69	976,26
–133,52	1013,06	512,1	1463,5	488,57	1358,45
4700,48	16598,23	8152,6	16440,4	6892,88	16988,9
20439,08	133945,74	21948,1	94311	20562,8	106010

Коэффициент детерминации линейной регрессии составляет 0,992, дерева решений – 0,991, леса решений – 0,983. Таким образом, результаты прогнозирования точные и на них можно проводить исследование альфы Кронбаха [9].

Альфа Кронбаха рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \left(\frac{\kappa}{\kappa - 1}\right) \cdot \left[1 - \frac{\sum\left(s_i^2\right)}{s_{сум}^2}\right]. \quad (1)$$

По формуле (1) были проведены расчеты альфы Кронбаха для результатов прогноза моделей машинного обучения, результат составил 0,96, что соответствует превосходной надежности, согласованности данных.

Далее для проверки гипотезы оценивается согласованность между данными количества инновационных товаров, работ, услуг, вновь внедренных или подвергавшихся значительным технологическим изменениям в течение времени за 2017–2019 гг. Данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Данные за 2017–2019 гг.

2017		2018		2019	
9 446,0	349 848,0	8 152,6	367 952,5	20 743,8	347 476,6
442,5	108 839,1	491,5	116 171,5	23,6	95 284,4
457,3	25 636,5	0,4	16 440,4	88,2	56 377,0
10 430,5	34 127,3	16 211,2	39 120,7	27 587,1	44 047,2
0,0	27 610,3	213,6	21 948,1	842,1	36 299,3
181,5	233 738,1	512,1	192 789,8	284,4	181 959,2
2 435 473,6	107 966,3	2 392 416,2	94 311,0	2 497 693,1	161 761,2
224 558,5	115 843,2	231 546,8	120 875,7	220 309,7	108 849,8
2 140 102,3	40 622,7	2 077 459,1	37 102,5	2 070 895,3	42 913,5
240 423,8	45 713,4	223 993,3	63 821,8	203 739,0	49 658,2
20 883,8	354 042,2	10 883,2	462 583,8	12 544,0	373 219,7
3 270,2	377 746,5	3 901,4	260 552,4	1 274,8	305 956,0
4 750,0	896,7	4 167,0	377,5	5 150,8	326,6
959,6	1 157,6	237,3	1 188,5	194,8	2 356,1
188,2	3 773,6	82,2	1 463,5	143,8	20 472,1
6 814,6	64 454,5	13 737,9	69 077,6	3 366,1	192 146,0
34 410,7	6 358,4	18 823,5	14 332,6	8 932,6	14 342,1
839,8	2 017,0	4 933,7	2 018,0	8 592,4	2 019,0

Альфа Кронбаха составила 0,99 по формуле (1). Таким образом, данные за последние 3 года поменялись незначительно, что свидетельствует о высокой степени согласованности и достоверности результата.

Заключение

Проведение анализа надежности результатов прогнозирования разных моделей машинного обучения с использованием альфы Кронбаха возможно. Однако необходимо учитывать другие характеристики моделей, такие как точность прогнозирования, скорость обучения и другие факторы, которые могут

влиять на их эффективность. Следовательно, выдвинутая гипотеза о возможности использования коэффициента надежности – альфы Кронбаха – для оценки изменения количественных данных в изменении их за разный период времени или для оценки качества моделей прогнозирования подтверждается.

Библиографический список

1. Надежность и позиционный анализ. URL: http://statsoft.ru/home/textbook/modules/streliab.html (дата обращения: 20.11.2022).

2. Флойд В. Альфа Кронбаха (α): что это такое и как используется в статистике. URL: https://ru1.warbletoncouncil.org/alfa-de-cronbach-4917 (дата обращения: 20.11.2022).

3. Надежность. URL: http://statsoft.ru/home/textbook/glossary/gloss_n.html (дата обращения: 20.11.2022).

4. Альфа Кронбаха. URL: https://azps.ru/handbook/statistic/alyfa_kronbaha.html (дата обращения: 21.02.2023).

5. Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/ (дата обращения: 20.03.2023).

6. Основы линейной регрессии // Хабр. URL: https://habr.com/ru/post/514818/ (дата обращения: 20.03.2023).

7. Открытый курс машинного обучения. Тема 3. Классификация, деревья решений и метод ближайших соседей // Хабр. URL: https://habr.com/ru/company/ods/blog/322534/ (дата обращения: 20.03.2023).

8. Метрики и оценки: количественная оценка качества прогнозов // scikit-learn.ru. URL: https://scikit-learn.ru/3-3-metrics-and-scoring-quantifying-the-quality-of-predictions/ (дата обращения: 20.03.2023).

9. Митина О. В. Альфа Кронбаха: когда и зачем ее считать // livejournal. URL: https://rabota-psy.livejournal.com/334199.html (дата обращения: 21.02.2023).

УДК 608

О. М. Герасимов*
кандидат технических наук, доцент
К. И. Домкин*
кандидат технических наук
Г. И. Коршунов**
доктор технических наук, профессор
Г. А. Северинец*
мастер ТРИЗ
*АО «Научно-промышленные консультанты»
**Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА И УСТРАНЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ НЕДОСТАТКОВ

Рассматриваемая методика работы над совершенствованием технологических процессов предусматривает поэтапное выполнение основных аналитических процедур. Наиболее эффективным инструментом совершенствования технологических процессов является свертывание. Оно проводится после функционального моделирования и построения диагностической таблицы, при этом учитывается наличие у свертываемых элементов (технологических операций) ключевых недостатков.
Ключевые слова: ТРИЗ, консалтинг, функционально-стоимостной анализ, функциональный подход, техпроцессы.

O. M. Gerasimov*
PhD, Tech., Associate Professor
K. I. Domkin*
PhD, Tech.
G. I. Korshunov**
Dr. Sc., Tech., Professor
G. A. Severinets*
Master of the Theory of Inventive Problem Solving
*Joint-Stock Company «Scientific and industrial consultants»
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ORGANIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES BASED ON THE ANALYSIS AND ELIMINATION OF KEY DISADVANTAGES

The considered method of work on the improvement of technological processes provides for the step-by-step implementation of the main analytical procedures. The most effective tool for improving technological processes is folding. It is carried out after functional modeling and building a diagnostic table, taking into account the presence of key disadvantages in the collapsible elements (technological operations).
Keywords: TRIZ, consulting, functional-cost analysis, functional approach, technical processes.

Введение

Рассмотрена проблема организации технологических процессов на основе анализа ключевых недостатков. Общие положения методики базируются на положениях функционально-стоимостного анализа (ФСА) [1] и теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) [2–8]. Цель работы – улучшение технологических процессов за счет устранения их ключевых недостатков. Методика показана на выполнении экспресс-проекта по совершенствованию технологического процесса изготовления обрезиненной стальной ленты.

1. Формулировка исходной ситуации

Для изготовления стальной обрезиненной ленты используется технология (рис. 1, 2), состоящая из нескольких основных операций: подготовки стальной ленты, подготовки эластомера (смеси резины и растворителя), нанесения эластомера и стабилизации эластомера. Главная проблема у заказчика – высокая стоимость готовой продукции.

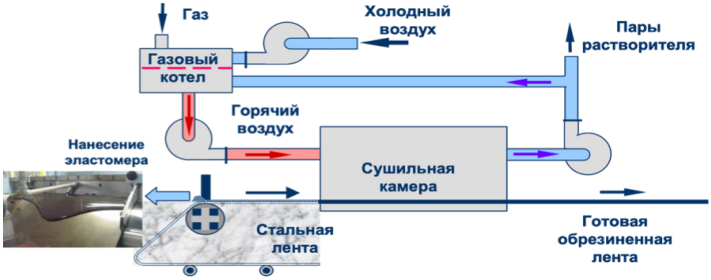


Рис. 1. Технологическая линия по изготовлению обрезиненной ленты

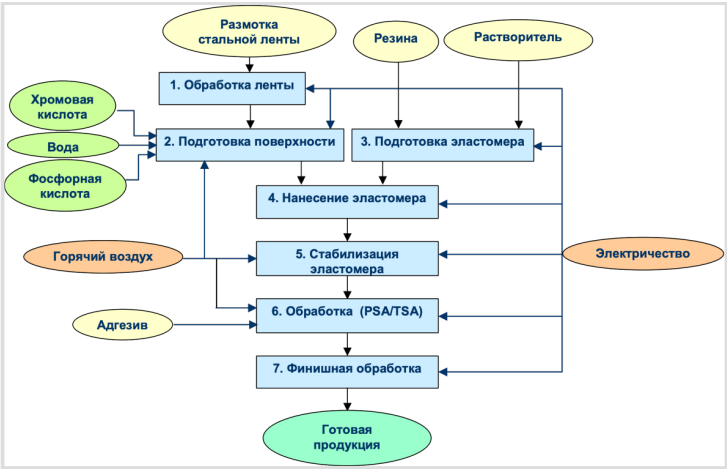


Рис. 2. Функциональная модель технологического процесса

2. Построение функциональной модели технологического процесса

В таблице приведен фрагмент функциональной модели технологического процесса изготовления обрезиненной ленты.

Функциональная модель технологического процесса (фрагмент)

№	Функция технологической операции	Тип функции	Уровень выполнения функции	Функциональная значимость, F	Проблемная значимость, P	Затратная значимость, C
Главная функция «Обрезинить стальную ленту»						
1.	Подготовка ленты					
1.1.	Разматывать ленту	Обеспечивающая	А	1	2	1
…	…	…	…	…	…	…
Сумма баллов:				23	56	125
5	Стабилизация эластомера					
5.1	Подавать воздух к сушильной камере	Транспортная	И	1	5	2
…	…	…	…	…	…	…
Сумма баллов:				50	132	251

3. Проведение причинно-следственного анализа и определение ключевых недостатков

На рис. 3 приведен фрагмент причинно-следственной цепочки.

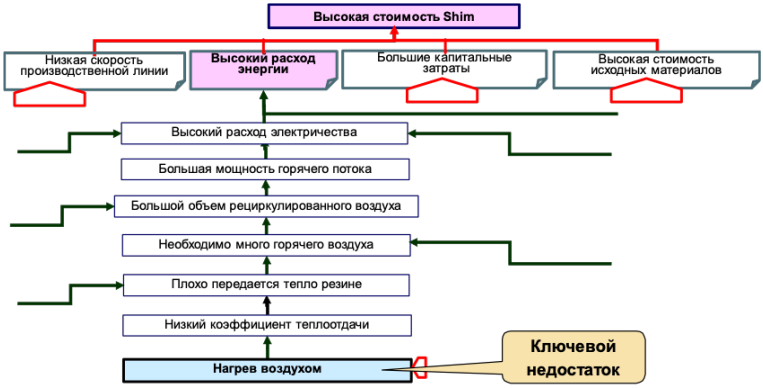


Рис. 3. Причинно-следственная цепочка (фрагмент)

Перечень всех ключевых недостатков технологического процесса.

1. Нагрев горячим воздухом.

2. Низкая температура наносимого эластомера.
3. Низкая текучесть наносимого эластомера.
4. Высокая температура испарения растворителя.
5. Высокая удельная теплоемкость растворителя.
6. Высокая скрытая теплота парообразования растворителя.
7. Большая удаленность сушильной камеры от нагревателей.
8. Большая площадь поверхностей сушильной камеры.
9. Неоднородность и большие размеры кусков исходной резины.
10. Отсутствие связей в наносимом эластомере.
11. Горизонтальное положение ленты.

Выявленные в результате причинно-следственного анализа ключевые недостатки вошли только в три технологических блока (рис. 4).

1. Подготовка эластомера – ключевой недостаток № 9.
2. Нанесение эластомера – ключевые недостатки № 2, 3, 11.
3. Стабилизация эластомера – ключевые недостатки № 1, 4–8, 10.

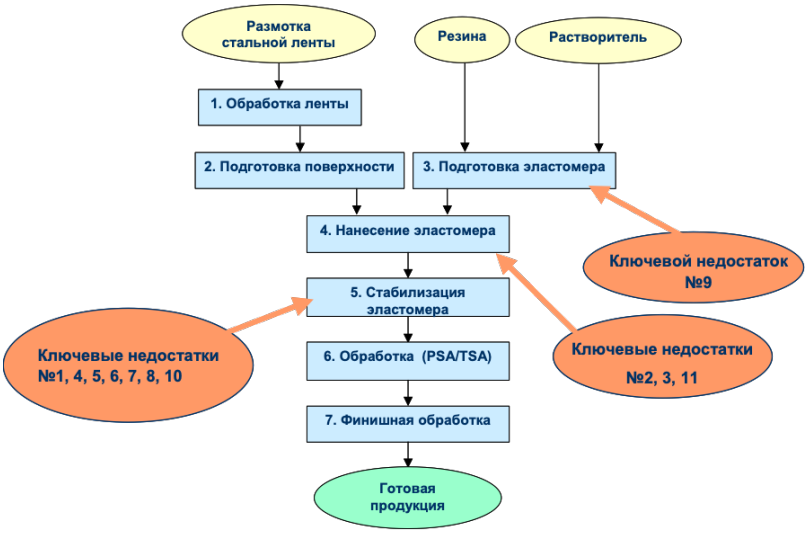


Рис. 4. Распределение ключевых недостатков по технологическим операциям

4. Свертывание элементов, порождающих ключевые недостатки

Определяем элементы технической системы (входящие в технологическую операцию), порождающие (или отвечающие за) ключевые недостатки. Определяем порядок свертывания этих элементов внутри каждого функционального технологического блока (технологической операции). Порядок свертывания определяется с учетом влияния элементов технической системы на объект главной функции.

Главная функция технологической операции «Стабилизация эластомера» – удалить растворитель из эластомера. Объектом главной функции соответственно будет растворитель. В этом случае основную функцию нагреть растворитель, т. е. функцию, обеспечивающую выполнение главной, будет выполнять воздух. Вспомогательную функцию, т. е. функцию, направленную на выполнение основной, будет выполнять поверхность сушилки и т. д. На рис. 5 показано свертывание элемента воздух, а на рис. 6 – результаты свертывания. Аналогично выполняется свертывание всех элементов, порождающих ключевые недостатки.

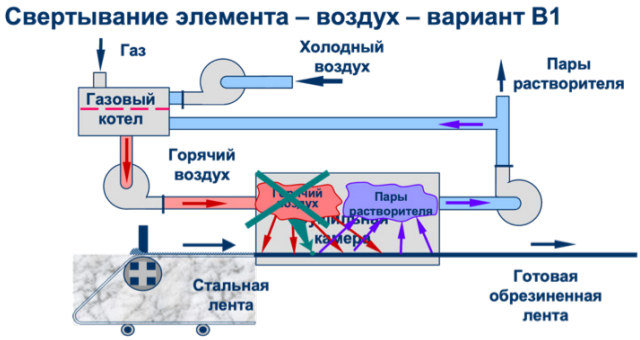


Рис. 5. Свертывание элемента воздух

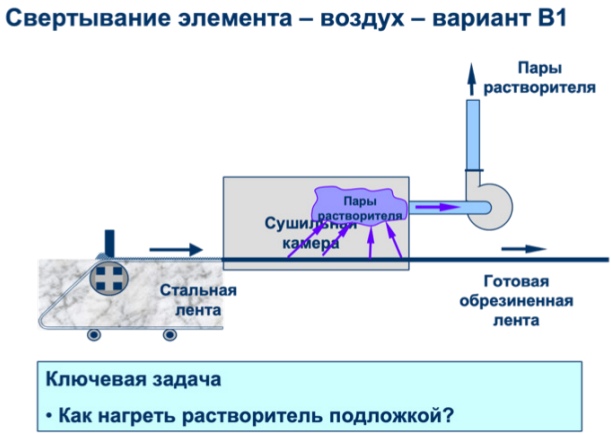


Рис. 6. Результаты свертывания

Далее происходят постановка и решение задачи свертывания.

Перечень задач свертывания (фрагмент).

1. Как обеспечить текучесть эластомера без растворителя?
2. Как обеспечить саморазогрев растворителя?
3. Как нагревать растворитель подложкой?
4. Как нагревать растворитель резиной?
5. Как нагревать растворитель парами растворителя?
6. Как нагревать растворитель поверхностью сушилки?
7. Как изменять текучесть эластомера наносителем?

Поставленные задачи свертывания решаются с применением обычных решательных инструментов методики ТРИЗ [9; 10].

Один из вариантов решения задачи свертывания «Как нагревать растворитель подложкой?» приведен на рис. 7.

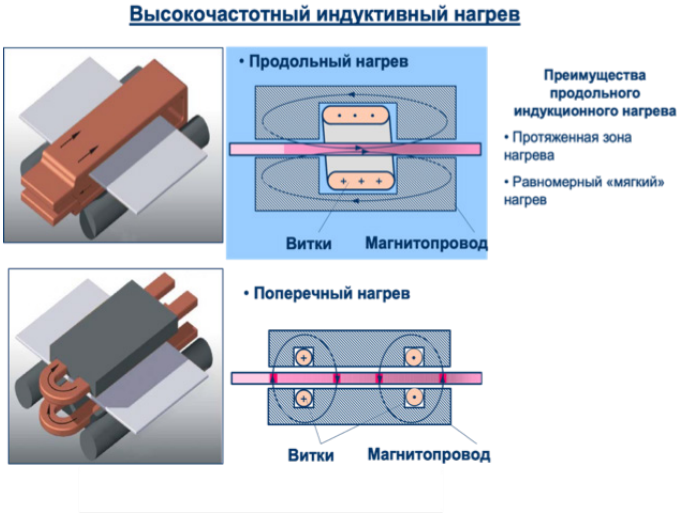


Рис. 7. Результаты решения задачи «Как нагревать воздух подложкой?»

Выводы

Предложенная методика позволяет интенсифицировать процесс выполнения экспресс-проектов по совершенствованию технологических процессов. Это достигается путем ликвидации ключевых недостатков посредством свертывания элементов, отвечающих за эти недостатки, по правилу свертывания элементов конструкции. Решение поставленных задач позволяет совершенствовать технологические операции без их ликвидации, избавиться от целевых недостатков и достичь цели проекта при минимальных затратах. Совместное использование методов анализа технологических операций и методов анализа конструкций делает методику более эффективной и результативной.

Библиографический список

1. Основные положения методики проведения функционально-стоимостного анализа: метод. рек. / разраб. В. М. Герасимов и др. М.: Информ-ФСА, 1991. 40 с.

2. Литвин С. С., Герасимов В. М. Основные положения методики проведения функционально-стоимостного анализа. Методические рекомендации части 4 и 5 // Журнал ТРИЗ. 1992. № 3.2.92, С. 7–45.

3. Герасимов О. М. Технология выбора инструментов инновационного проектирования на основе ТРИЗ-ФСА: дисс. на 5-й уровень по МАТРИЗ. URL: https://triz-summit.ru/certif/master/matriz/10/204739/ (дата обращения: 14.02.2023).

4. Герасимов О. М. Применение методики свертывания элементов конструкций при совершенствовании технологических процессов // Теория и практика решения изобретательских задач: сб. ст. М., 2007. С. 83–84.

5. Герасимов О. М., Алгоритм совершенствования технологических процессов с использованием правил свертывания конструкций // Три поколения ТРИЗ: Регион. науч.-практ. конф.: сб. докл. СПб., 2009.

6. Герасимов О. М., Домкин К. И., Северинец Г. А. Построение дорожных карт проектов с применением ТРИЗ // Надежность и качество: тр. Междунар. симп. 2020. Т. 2. С. 347–349.

7. Герасимов О. М., Домкин К. И., Северинец Г. А. Определение направлений развития продуктов по Главным Параметрам Качества (MPV) // Business TRIZ Online 2020. URL: http://www.biztriz.net/news/2-uncategorised/32-2020.html https://www.youtube.com/watch?v=uQ854Sl_Et0 (дата обращения: 14.02.2023).

8. Домкин К. И., Шпаковский Н. А. Программа поддержки процесса решения нетривиальных технических задач SOLVING MILL 2.0 // Надежность и качество: тр. Междунар. симп. 2021. Т. 2. С. 361–363.

9. Герасимов О. М., Домкин К. И., Северинец Г. А. Особенности проведения функционально-стоимостного анализа технологических процессов // Надежность и качество: тр. Междунар. симп. 2021. Т. 2. С. 331–333.

10. Коршунов Г. И., Петрушевская А. А., Смирнова М. С. Организация жизненного цикла электронной и приборной продукции в условиях технологических инноваций. СПб., 2019. 206 с.

УДК 005.6

Л. А. Климочкина*
ассистент
А. В. Чабаненко*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ВНЕДРЕНИЕ TQM В ТЕХНОСФЕРНУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В современном мире, где технологии играют огромную роль в производственном процессе, вопрос техносферной безопасности становится все более актуальным. Производственные предприятия, особенно те, которые работают с опасными и взрывоопасными веществами, должны строго соблюдать нормы техносферной безопасности, чтобы предотвратить возможные аварии и катастрофы.
Ключевые слова: качество, экология, контроль, улучшение.

L. A. Klimochkina*
Assistant
A. V. Chabanenko*
PhD, Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

IMPLEMENTATION OF TQM IN THE TECHNOSPHERE SAFETY OF MANUFACTURING ENTERPRISES

In the modern world, where technology plays a huge role in the production process, the issue of technosphere safety is becoming increasingly relevant. Industrial enterprises, especially those that work with hazardous and explosive substances, must strictly comply with technosphere safety standards in order to prevent possible accidents and disasters.
Keywords: quality, ecology, control, improvement.

Введение

Для обеспечения техносферной безопасности производственных предприятий можно использовать методологию TQM (Total Quality Management). TQM – это система управления качеством, которая основывается на постоянном совершенствовании процессов и продуктов, удовлетворении потребностей клиентов и увеличении эффективности организации [1].

Применение TQM в производственных предприятиях может помочь улучшить техносферную безопасность через повышение качества продукции и управления процессами. Реализация TQM может обеспечить следующие преимущества в области техносферной безопасности.

1. Улучшение качества продукции: помогает предотвращать производственные дефекты, а также обеспечивает высокое качество продукции. Это

особенно важно для производственных предприятий, которые работают с опасными веществами. Высокое качество продукции гарантирует минимизацию ошибок и снижение риска аварий.

2. Управление рисками: позволяет управлять рисками в производственных процессах. Система TQM включает анализ рисков и разработку планов по их управлению. Это помогает производственным предприятиям уменьшить риски аварий и катастроф.

3. Улучшение безопасности персонала: включает обучение и подготовку персонала. Это помогает сотрудникам производственных предприятий снизить риск ошибок и аварий. Обучение персонала подразумевает не только технические знания, но и понимание важности безопасности на рабочем месте.

4. Повышение эффективности производства: помогает улучшить управление производственными процессами и снизить затраты на производство. Это может включать оптимизацию производственных цепочек, улучшение процессов поставки и повышение эффективности использования оборудования. Это в свою очередь может уменьшить вероятность аварий и сократить время на ремонт оборудования, что повысит общую техносферную безопасность на предприятии.

5. Улучшение коммуникации: включает улучшение коммуникации между сотрудниками и различными отделами предприятия. Это может помочь улучшить обмен информацией и реагирование на проблемы, связанные с техносферной безопасностью.

6. Контроль качества: включает мониторинг и контроль качества продукции и производственных процессов. Это может помочь производственным предприятиям определить проблемы, связанные с техносферной безопасностью, и предотвратить возможные аварии.

В целом внедрение TQM (рис. 1) может принести значительные преимущества для техносферной безопасности производственных предприятий. Но для успешного внедрения системы необходимы серьезная подготовка и участие всего коллектива предприятия. Организация должна разработать стратегию внедрения TQM, провести обучение сотрудников и создать условия для поддержки процесса внедрения. Только в этом случае можно ожидать значительного улучшения техносферной безопасности и повышения эффективности работы предприятия в целом.

Внедрение Total Quality Management (TQM) – ключевой процесс для улучшения качества продукции и услуг, а также для повышения эффективности организации. TQM – это философия управления, которая стремится к постоянному совершенствованию продукции, услуг и процессов организации, а также к удовлетворению потребностей клиентов [2].

Внедрение TQM состоит из нескольких этапов. Первый – оценка текущей ситуации в организации. Это включает оценку текущего уровня качества продукции и услуг, анализ систем управления качеством, выявление проблем и недостатков и оценку уровня удовлетворенности клиентов.

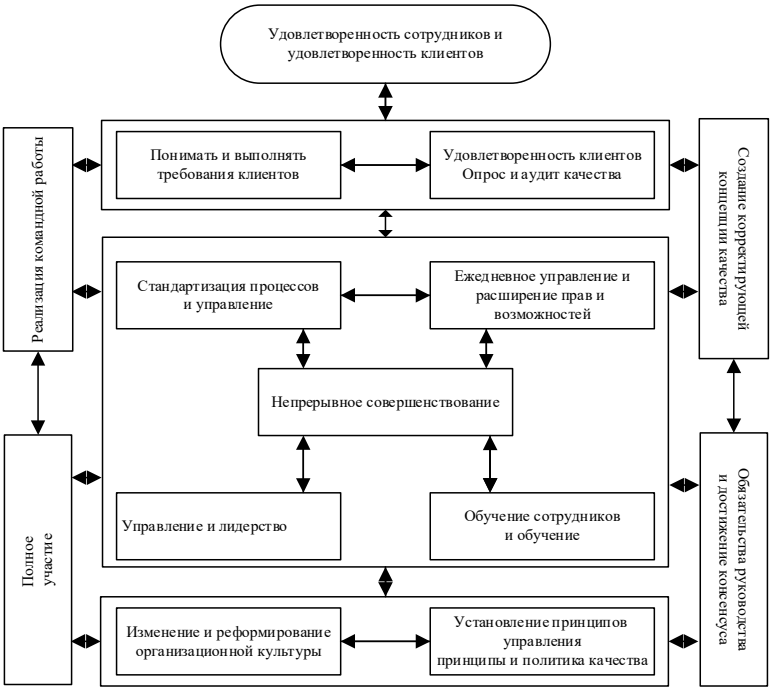


Рис. 1. Схема внедрения TQM

Далее следует определение целей и стратегии внедрения TQM. Это может включать разработку плана действий, определение ключевых показателей производительности и установление мер, необходимых для достижения целей [3].

Следующий этап – создание команды TQM, которая будет отвечать за внедрение и поддержание системы управления качеством в организации. Эта команда должна быть достаточно квалифицированной и иметь опыт в управлении качеством. Она должна также иметь поддержку высшего руководства организации.

Одни из ключевых элементов внедрения TQM – обучение и подготовка персонала. Могут включать проведение обучения по системам управления качеством, управлению процессами, методам и инструментам качества, а также тренинги по улучшению коммуникации и командной работы.

Другой важный этап – установление системы управления качеством в организации. Включает разработку и внедрение стандартов и процедур, которые позволят обеспечить постоянное совершенствование продукции и услуг, а также процессов организации. Организация также должна создать систему контроля качества и мониторинга производительности, которая позволит отслеживать достижение поставленных целей (рис. 2).

Рис. 2. Экология предприятия

Внедрение TQM позволяет организации улучшить качество продукции и услуг, сократить затраты на неэффективные процессы, увеличить удовлетворенность клиентов и сотрудников, повысить конкурентоспособность на рынке и обеспечить стабильный рост организации в долгосрочной перспективе. Однако внедрение TQM не является простым процессом и может столкнуться с рядом препятствий. Одно из главных – отсутствие поддержки высшего руководства и нехватка ресурсов. Для успешного внедрения TQM необходимо иметь сильное руководство, которое готово уделить достаточное количество времени, денег и ресурсов на внедрение и поддержание системы управления качеством. Другими препятствиями могут быть недостаточное понимание философии TQM и отсутствие обучения и подготовки персонала. Чтобы успешно внедрить TQM, необходимо обеспечить понимание философии и методологии управления качеством в организации. Это можно сделать через проведение обучения и тренингов, а также через создание культуры постоянного совершенствования и улучшения. В целом внедрение TQM может стать эффективным инструментом улучшения качества продукции и услуг, повышения эффективности организации и удовлетворенности клиентов и сотрудников. Однако, чтобы успешно внедрить TQM, необходимо иметь поддержку высшего руководства, обученный и готовый к работе персонал, а также эффективную систему управления качеством.

Библиографический список

1. Chabanenko A. V., Yastrebov A. P. Quality Assurance of Hull Elements of Radio-Electronic Equipment by Means of Control System // J. Phys.: Conf. Ser. 1515. 2018. 052065.

2. Чабаненко А. В. Управление качеством аддитивных изделий // Стандарты и качество. 2018. № 2. С. 90–94.

3. Рассыхаева М. Д., Чабаненко А. В. Внедрение информационной PLM системы в организации // Избранные научные труды двадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством». М., 2021. С. 285–289.

УДК 62-2

Т. П. Мишура
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО НАСОСА ГЦНА-1753

Представлена телеметрическая измерительная система, которая позволяет провести испытания на воздействие механических напряжений на вращающемся валу циркулярного насоса ГЦНА-1753, получить зависимости крутящего момента и осевого усилия на валу от основных теплотехнических параметров. Анализ амплитуды и формы колебаний изгибных деформаций позволяет обеспечить необходимое качество центровки валов насосного агрегата.
Ключевые слова: циркулярный насос, механические напряжения, центровки валов.

T. P. Mishura
PhD, Tech., Associate Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DESIGN FEATURES OF THE CIRCULATOR GTSNA-1753

The paper presents a telemetric measuring system that allows testing the effects of mechanical stresses on the rotating shaft of the circular pump MCP-1753, to obtain the dependence of torque and axial force on the shaft on the main thermal parameters. Analysis of the amplitude and shape of vibrations of bending deformations allows to ensure the necessary quality of alignment of the shafts of the pumping unit.
***Keywords*:** circular pump, mechanical stresses, shaft alignment.

Главные циркуляционные насосные агрегаты (ГЦНА) – важная и неотъемлемая часть реакторной установки. Они обеспечивают интенсивную циркуляцию теплоносителя в первом контуре реактора. От надежной и бесперебойной работы ГЦНА напрямую зависит безопасность любой АЭС [1]. На рис. 1 представлена схема реакторной установки АЭС, на которой показано расположение ГЦНА относительно реактора.

Особенностью конструкции ГЦНА-1753 (рис. 2) является единый вал: жесткое соединение муфтой валов выемной части и электродвигателя. Это позволяет отказаться от использования раздельных радиально-опорных подшипников для двигателя и выемной части [2; 3] и перейти к конструкции с единым радиально-опорным подшипником, расположенным в электродвигателе. Также в ГЦНА-1753 осуществлен полный переход на смазывание и охлаждение подшипников водой, что позволяет отказаться от маслосистемы, следовательно, повысить пожаробезопасность реакторной установки [4].

Чтобы вал ГЦНА представлял собой жесткую конструкцию, необходима центровка валов двигателя и выемной части. Для этого необходимо провести ряд испытаний с помощью тензометрических датчиков и измерительной системы, с помощью которой фиксируются механические напряжения на валу. Состав измерительной системы представлен на рис. 3.

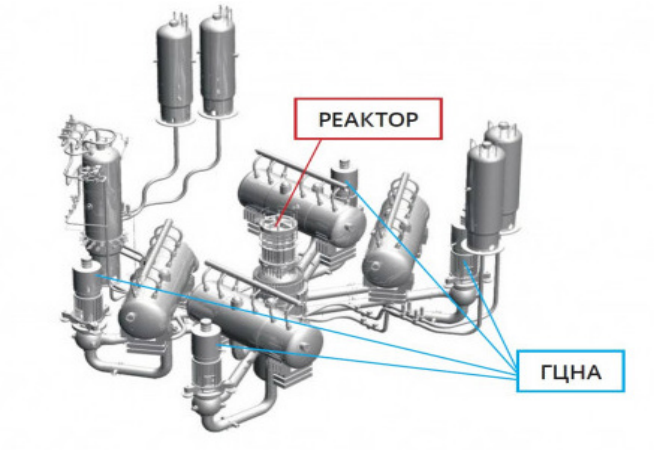


Рис. 1. Схема реакторной установки АЭС

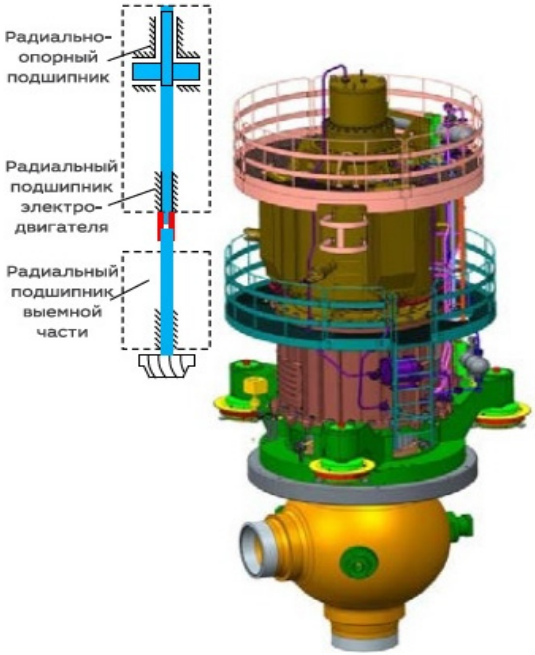


Рис. 2. Главный циркуляционный насосный агрегат ГЦНА-1753

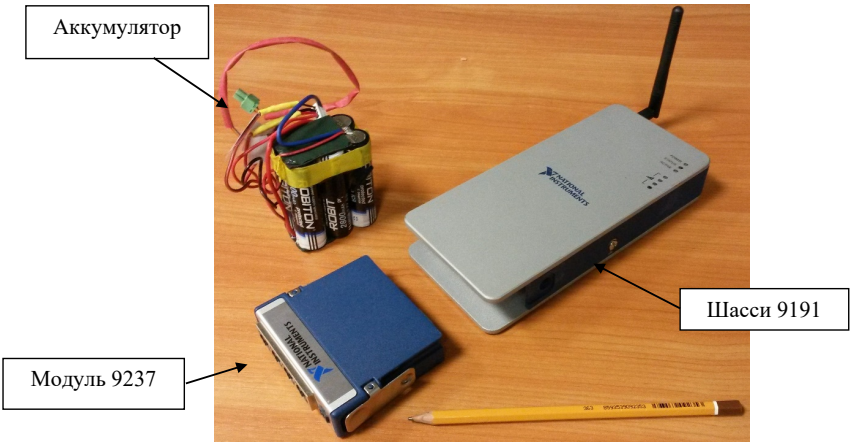


Рис. 3. Компоненты измерительной системы перед установкой

В систему входят следующие компоненты.

1. Однослотовое шасси DAQ-9191 производства National Instruments.

Это прибор с Wi-Fi, предназначенный для небольших удаленных или распределенных систем измерения с датчиками. Шасси будет установлено на вращающийся вал двигателя и предназначено для управления тактированием, синхронизацией и передачей данных между модулями ввода-вывода и внешним узлом. Его можно использовать вместе с различными модулями для создания комбинации аналоговых и цифровых вводов-выводов, а также счетчиков или таймеров. Возможна дистанционная передача данных с DAQ-9191 на главный пункт контроля. Шасси также оборудовано четырьмя универсальными встроенными 32-битными счетчиками. Для подсчета событий, генерации последовательности импульсов и измерения периода или частоты можно пользоваться этими счетчиками при помощи установленного цифрового модуля C-серии с аппаратной синхронизацией.

2. Модуль NI-9237 производства National Instruments.

4-канальный модуль NI 9237 обладает всеми функциями согласования сигналов, требуемыми для питания и измерения для четырех мостовых датчиков одновременно. Модуль обеспечивает измерение напряжений и нагрузки с нулевой задержкой фазы. NI 9237 можно запрограммировать на работу с полумостовыми и полномостовыми датчиками. Четыре разъема RJ50 обеспечивают прямое подключение к большинству датчиков вращающего момента или нагрузки.

3. Аккумулятор.

Аккумуляторная батарея состоит из 6 Li-ion-ячеек и имеет номинальное напряжение 11 В.

4. Тензометры типа TML UFLA-3-350-11.

В этих тензорезисторах используется решетка из фольги медно-никелевого сплава и подложка из специальной пластмассы. Пластиковая подложка показывает отличные электроизоляционные характеристики и имеет цветовое кодирование для идентификации целевого материала с целью обеспечения температурной самокомпенсации.

Основные характеристики тензорезистора UFLA-3-350-11 (рис. 4):

– UFLA – основной тип тензорезистора;
– 3 – длина подложки тензорезистора;
– 350 – сопротивление тензорезистора, Ом;
– 11 – коэффициент температурной самокомпенсации.

Материал тензорезистора – мягкая сталь. Диапазон рабочей температуры от –196 °С до 150 °С.

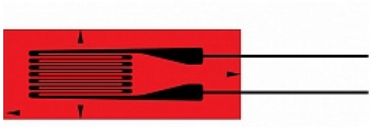


Рис. 4. Тензорезистор UFLA-3-350-11

5. Тензометры типа TML FCT-2-350.

Для данного типа тензорезистора (рис. 5) используется решетка из фольги медно-никелевого сплава и подложка из специальной пластмассы.

Тензометры TML FCT-2-350 применяются для измерения крутящего момента. Их особенностью является точное позиционирование измерительных решеток под углом 45° к оси подложки тензорезистора. Это решение использовано для точного наложения измерительной решетки по направлению тензора напряжений в измеряемом образце.

Рис. 5. Тензорезистор FCT-2-350

Все перечисленные компоненты составляют измерительную систему (рис. 6), задачей которой является измерение механических напряжений непосредственно на вращающемся валу ГЦНА-1753.

Шасси 9191 закрепляется на валу ГЦНА, получает данные от установленного измерительного модуля и передает их на персональный компьютер,

оснащенный специализированным программным обеспечением разработки National Instruments (Signal Express или LabView) с использованием технологии Wi-Fi. Шасси 9191 получает питание от закрепленной на вращающемся валу аккумуляторной батареи, состоящей из 6 Li-ion-ячеек и имеющей номинальное напряжение 11 В. Измерительный прибор способен проработать до 12 часов, питаясь от аккумуляторной батареи. Для измерения механических напряжений в шасси был установлен измерительный модуль 9237, позволяющий регистрировать показания четырех тензометрических датчиков.

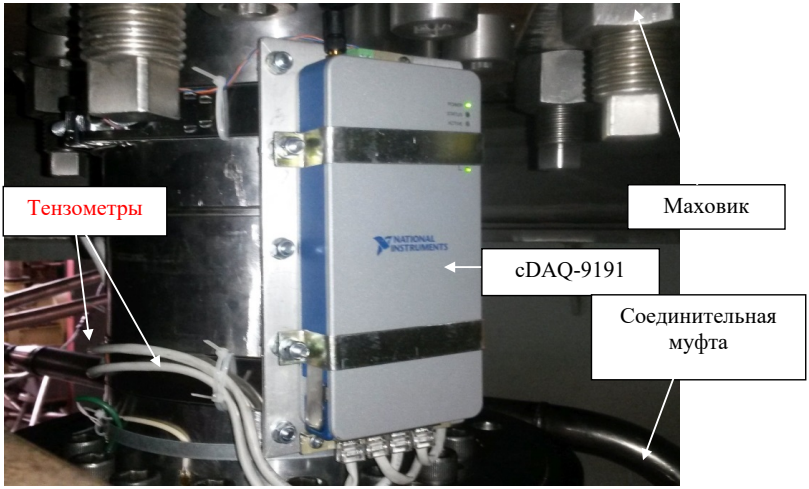


Рис. 6. Вид на установленную на валу систему. На переднем плане шасси 9191. Диаметр вала в месте установки 200 мм

Шасси 9191 с измерительным модулем 9237 и аккумуляторной батареей устанавливаются на нижнюю часть вала электродвигателя между соединительной муфтой и маховиком. Для установки было изготовлено оригинальное крепежное приспособление, которое позволило обеспечить безопасное крепление устройства с возможностью долгосрочной работы на номинальных режимах.

Собранная телеметрическая система позволяет провести испытания на воздействие механических напряжений, получить зависимости крутящего момента и осевого усилия на валу от основных теплотехнических параметров. Анализ амплитуды и формы колебаний изгибных деформаций позволяет обеспечить необходимое качеством центровки валов насосного агрегата.

Библиографический список

1. Экспериментальное определение параметров вихревых насосов судовых дизелей с использованием тензометрии / А. В. Трифонов, М. Н. Покусаев, В. В. Шахов [и др.]. М.: Мор. интеллектуал. технологии, 2019. 87 с.

2. Насосы для атомных электростанций. URL: https://nasos.biz›nasosy-dlya-atomnykh-elektrostantsiy (дата обращения: 31.01.23).

3. Виноградова Г. С. Методика выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования для атомных электростанций. URL: https://www.voenmeh.ru/images/docs/science/disser/disser-councils/Vinogradova_GS_Dissertaziya.pdf (дата обращения: 31.01.23).

4. Ядерные реакторы с водой сверхкритического давления (основы теплового расчета): учеб. пособие для вузов / В. И. Деев [и др.]; под общ. ред. В. И. Деева. 2-е изд. М.: Юрайт, 2022. 156 с.

УДК 006.1

Т. П. Мишура*
кандидат технических наук, доцент
К. В. Епифанцев*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРИБОРОВ И СТАНДАРТОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ

Измерение шероховатости в РФ регламентируется рядом ГОСТов, которые определяют порядок условно-графического обозначения и контроля качества шероховатости. Процесс измерения шероховатости производится с помощью профилометров, которые в свою очередь, калибруются эталонными мерами [1]. Разногласия между обозначениями шероховатости встречаются при сравнении обозначений шероховатости в российских ГОСТах и зарубежных стандартах по причине постоянно развивающихся приборов для измерения шероховатости и увеличению численности контролируемых параметров. Современные стандарты для обозначения шероховатостей в различных странах имеют ряд противоречий, о которых пойдет речь в статье.
Ключевые слова: профилометры-профилографы, шероховатость, микронеровности.

T. P. Mishura*
PhD, Tech., Associate Professor
K. V. Epifantsev*
PhD, Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF DEVICES AND STANDARDS FOR ROUGHNESS MEASUREMENT

Roughness measurement in the Russian Federation is regulated by a number of GOST standards, which determine the order of conditional graphic designation and quality control of roughness. The roughness measurement process is performed using profilometers, which in turn are calibrated by reference measures [1]. Differences between roughness designations occur when comparing roughness designations in Russian GOST and foreign standards due to constantly developing devices for measuring roughness and an increase in the number of controlled parameters. Modern standards for the designation of roughness in various countries have a number of contradictions, which will be discussed in the article.
Keywords: profilometers-profilographs, roughness, micro-roughness.

Приоритетные направления развития российской промышленности – модернизация и импортозамещение зарубежного оборудования, производящего измерения микрометрической точности.

Параметры шероховатости имеют большое разнообразие, согласно стандартам различных стран, обозначены следующими условно-графическими обозначениями: **Ra,** Rq, Ry, Rp, Rv, Rc, **Rz, Rmax,** Rt, Rz.J, R3z, **Sm, S,** RΔa, RΔq, Rλa, Rλq, TILTA, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2, VO, K, **tp,** Rmr, tp2, Rmr2, Rδc, AVH,

Hmax, Hmin, AREA, NCRX, R, Rx, AR, NR, CMP, SR, SAR. Отмеченные полужирным шрифтом обозначения рассмотрены в ГОСТ 2789, остальные – в других международных стандартах. Присутствие в межгосударственном стандарте только шести символов из более чем сорока обозначений параметров шероховатости и волнистости заставляет задуматься о неминуемом развитии методов и приборов для измерения данного важного параметра обработки поверхности. С другой стороны, нет единого общего требования к производителям приборов данного типа, так как в ряде стран данные параметры не совпадают, одни и те же символы по-разному трактуются. Процесс обработки поверхностей всегда интересовал производителей подшипниковых узлов, микроскопов, систем прецизионных измерений.

Российские стандарты по контролю шероховатости регламентируются документами [2–9]. Эволюция развития измерительного оборудования шероховатости прошла несколько этапов (рис. 1). Производство профилометров-профилографов в нашей стране прекратилось в 1992 г., что существенно осложнило положение с приборостроительными возможностями в настоящее время.

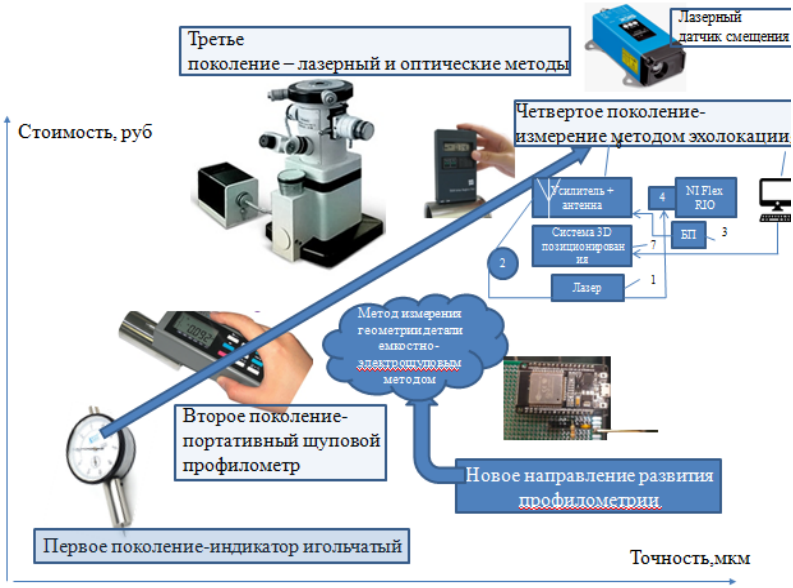


Рис. 1. Этапы эволюции приборов для измерения шероховатости

Первое поколение – непосредственно механический индикатор частоты с иглой, который работает по принципу ощупывания поверхности иглой и передачи данных показаний на индикатор часового типа. Прибор данного типа в настоящее время наиболее доступный по цене, калибровке и подготовке к из-

мерению, однако может оценить лишь один параметр отклонения косвенно, после чего приходится пересчитывать полученные значения в Rz, Rmax и др.

Второе поколение – применение в профилометре индуктивного датчика (измерительный щуп) с алмазной иглой, работающего по принципу датчиков индуктивности, которые улавливают микросмещение иглы.

Третье поколение – лазерный профилометр, который работает по принципу улавливания отраженного сигнала от поверхности и приема этого сигнала.

Четвертое поколение – ультразвуковая профилометрия, которая работает за счет улавливания отраженных звуковых волн от поверхности. Четвертое поколение является перспективным. Применяется достаточно редко из-за ограниченности созданных приборов и доступности данных приборов для широкого круга промышленных предприятий.

Современная тенденция развития измерительных приборов все более тщательно создает, внедряет приборы для контроля дефектов формы, шероховатости и волнистости поверхности. В стандарте [10] приведено большое количество новых условно-графических обозначений, касающихся контроля геометрических параметров деталей, таких перпендикулярность, круглость и др.

Приборостроение и машиностроение как перспективные отрасли российской экономики главной целью ставят увеличение производительности готовых образцов техники, уменьшение количества негодных к применению составных частей машин. Элементы шероховатости являются неотъемлемой частью контролируемых параметров, которые влияют на притираемость изделий, их площадь контакта, переход узлов машин из напряженно-деформированного состояния в стабильное рабочее состояние. Шероховатость также формирует определенные группы посадок между валами и отверстиями, позволяет планировать износостойкость изделий при различных режимах работы [11].

Все приборы для измерения шероховатости в настоящее время проходят эру цифровизации. Современные цифровые технологии позволили оснастить приборы для измерения шероховатости возможностью подключения к персональному компьютеру, высокой степенью быстродействия, хорошими эргономическими характеристиками. Пример нового прибора представлен на рис. 2, он оснащен преобразователем, электронным измерительным блоком со счетно-решающим блоком и записывающимся устройством.

Внимание к шероховатости в настоящее время обусловливается созданием новых видов транспорта, который должен иметь минимальное трение подвижных элементов для того, чтобы использовать при этом минимальное количество энергии, увеличивая КПД. Также интерес к приборам для измерения шероховатости обусловлен значительным развитием оптической техники, используемой, например, в телескопах или в спутниковых устройствах для снимков Земли. Солнечные батареи, использующиеся для генерации электроэнергии, проходят контроль шероховатости поверхности. Протезы, вживляемые в организм, также контролируются с помощью профилометров, так как величина параметров неровностей поверхностей прямо пропорционально влияет на приживаемость.

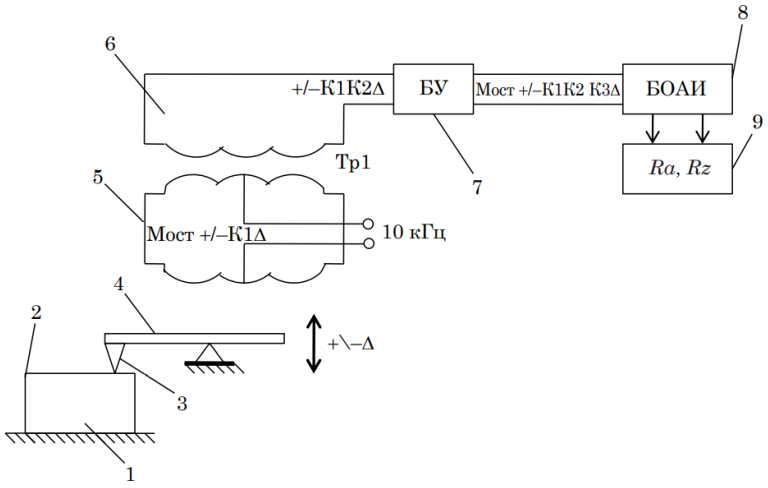


Рис. 2. Схема цифрового профилограф-профилометра:
1 – стол; 2 – деталь; 3 – алмазная игла; 4 – щуп; 5 – мостовая схема; 6 – трансформатор; 7 – блок усиления; 8 – блок обработки аналоговой информации; 9 – устройство цифровой индикации аналоговой информации; К1, К2, К3 коэффициенты вертикального усиления устройств; Тр1 – трансформатор (катушка индуктивности для съема показаний колебания щупа)

Библиографический список

1. ГОСТ 8.296–78 «ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений шероховатости Rmax и Rz в диапазоне от 0,025 до 1600 мкм». М.: Изд-во стандартов, 1980.

2. ГОСТ 25142–82 (СТ СЭВ 1156–78) «Шероховатость поверхности. Термины и определения» (с Изменением № 1). М., 1983. 28 с.

3. ГОСТ 2789–73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики» (с Изменениями № 1, 2). М., 1973. 15 с.

4. ГОСТ 19300–86 «Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры» (с Изменением № 1). М., 1987. 12 с.

5. ГОСТ 2.309–73 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Обозначения шероховатости поверхностей» (с Изменениями № 1, 2, 3). М., 1975. 14 с.

6. ГОСТ Р ИСО 4287–2014 «Геометрические характеристики изделий (gps) Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности». М., 2016. 23 с.

7. ГОСТ 9378–93 (ИСО 2632-1–85, ИСО 2632-2–85) «Образцы шероховатости поверхности (сравнения). Общие технические условия» (с Поправкой). М., 1997. 12 с.

8. ГОСТ 9847–79 «Приборы оптические для измерения параметров шероховатости поверхности Типы и основные параметры» (с Изменениями № 1, 2). М., 1981. 8 с.

9. МИ 41-88 Методические указания. ГСИ. Методика выполнения измерений параметров шероховатости поверхности по ГОСТ 2789–73 при помощи приборов профильного метода. М., 1988. 17 с.

10. ГОСТ 53442–2015 «Основные нормы взаимозаменяемости». М.: Стандартинформ, 2015. 14 с.

11. Епифанцев К. В. Интерпретации системы координирующих размеров и размерных элементов КД / /Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23, № 6 (104). С. 52–55.

УДК 005.6

М. Д. Рассыхаева
ассистент
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ИНТЕГРИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДЕЛОВОГО СОВЕРШЕНСТВА В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ

Рассмотрена интегрированная модель делового совершенства на производстве. Это система управления, которая объединяет стратегическое планирование, сбалансированную систему показателей и методы хошин-менеджмента. Она позволяет оценивать эффективность и качество производственных процессов, определять ключевые показатели производительности, управлять изменениями и повышать качество продукции.
Ключевые слова: структурирование производственных процессов, индустрия 4.0, цифровое производство, качество, управление производством.

M. D. Rassykhaeva
Assistant
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

INTEGRATED MODEL OF BUSINESS EXCELLENCE IN ELECTROMECHANICS

The article considers an integrated model of business excellence in production, a management system that combines strategic planning, a balanced scorecard and hoshin management methods. It allows you to evaluate the efficiency and quality of production processes, determine key performance indicators, manage changes and improve product quality.
Keywords: structuring of production processes, industry 4.0, digital production, quality, production management.

Введение

Применение интегрированной модели делового совершенства на производстве требует систематического подхода, постоянного мониторинга и анализа результатов, чтобы компания могла реагировать на изменения внутри компании и внешние факторы быстро и эффективно. Для успешного внедрения интегрированной модели делового совершенства на производстве необходимо также обеспечить активное участие и поддержку руководства компании, а также обучить сотрудников новым методам и инструментам.

Одним из примеров успешного применения интегрированной модели делового совершенства на производстве является компания Toyota. Она использовала такие инструменты, как TQM, MES, управление проектами и шесть сигм, чтобы повысить качество продукции, сократить время производственного цикла и уменьшить затраты. Кроме того, Toyota активно применяет систему Kaizen, которая означает «непрерывное улучшение» и включает постоянное совершенствование производственных процессов [1].

Затраты на качество

Применение интегрированной модели делового совершенства на производстве может помочь компании повысить эффективность и качество производственных процессов, а также улучшить удовлетворенность клиентов и прибыльность. Вот некоторые из инструментов, которые могут использоваться в этой модели на производстве.

1. Управление качеством (Total Quality Management, TQM) – подход к управлению качеством, который включает систему контроля качества, улучшение процессов и удовлетворение потребностей клиентов. TQM может быть использован на производстве для повышения качества продукции и уменьшения отходов.

2. Система управления производственными процессами (Manufacturing Execution System, MES) – программа, которая управляет производственными процессами, такими как планирование производства, управление запасами и контроль качества. MES может помочь компании повысить эффективность производства и уменьшить время производственного цикла.

3. Сбалансированная система показателей (Balanced Scorecard, BSC) – метод управления бизнесом, который оценивает производственные процессы и результаты компании на основе нескольких показателей, таких как финансовые, процессные, клиентские и обучающие. BSC может помочь компании определить, какие производственные процессы нужно улучшить, чтобы достичь желаемых результатов.

4. Управление проектами (Project Management) – метод управления проектами, который используется для планирования, организации и контроля проектов. Управление проектами может быть использовано на производстве для управления проектами по улучшению производственных процессов и внедрению новых технологий.

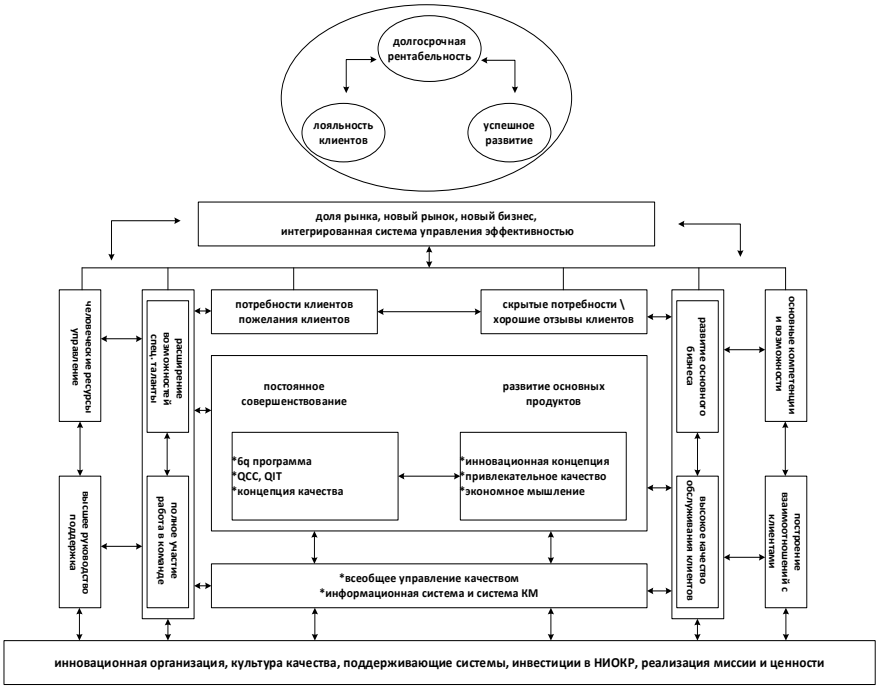
5. Шесть сигм (Six Sigma) – методология, которая используется для улучшения процессов и уменьшения отклонений. Может быть использована на производстве для улучшения качества продукции и уменьшения отходов [2].

Применение интегрированной модели делового совершенства на производстве требует систематического подхода, постоянного мониторинга и анализа результатов, чтобы компания могла реагировать на изменения внутри компании (рисунок).

Интегрированная модель делового совершенства – это подход к управлению бизнесом, который объединяет различные методы и инструменты для достижения максимальной эффективности и эффективности во всех аспектах деятельности компании. Включает сбалансированную систему показателей (Balanced Scorecard), управление качеством (Total Quality Management), управление процессами (Business Process Management), управление проектами (Project Management) и другие инструменты управления бизнесом.

Цель интегрированной модели делового совершенства – обеспечить более эффективное использование ресурсов компании, повысить ее конкурентоспособность и удовлетворение клиентов, а также увеличить прибыльность. Важ-

ный аспект этой модели – постоянное улучшение процессов, продуктов и услуг, чтобы они лучше соответствовали потребностям клиентов и требованиям рынка.



Интегрированная модель делового совершенства

Интегрированная модель делового совершенства может быть адаптирована для различных отраслей и размеров компаний. Важно понимать, что она требует постоянного мониторинга и анализа результатов, чтобы бизнес мог реагировать на изменения внутри компании и на рынке.

Формирование показателей затрат на качество не всегда легкий процесс, поскольку большинство категорий затрат на качество не являются прямым компонентом в бухгалтерском учете организации. Следовательно, может быть трудно получить чрезвычайно точную информацию о расходах, понесенных в отношении различных категорий.

Система управления эффективностью была разработана путем интеграции менеджмента Хошин со стратегическим планированием и сбалансированной системой показателей (BSC). Сначала берется модель реализации стратегического планирования. Фирмы обычно проводят SWOT-анализ и разрабатывают видение, цели и стратегии всей организации. Установив видение, цели и

стратегии, фирма может затем разработать карту стратегии и ключевые показатели эффективности (KPI) в соответствии с четырьмя перспективами BSC. Затем фирма может использовать методы хошин-менеджмента для внедрения целей и стратегий организации и результирующих показателей эффективности в отделы или подразделения. В процессе внедрения они обычно проводят аудит качества в соответствии с хошин-менеджментом для составления обзоров прогресса и ежегодного обзора. Таким образом, организации используют интегрированную модель управления эффективностью для оценки результативности TQM.

Успех внедрения интегрированной модели делового совершенства зависит от реализации основополагающих принципов и условий, включая инновационную среду, культуру качества, конкурентоспособные поддерживающие системы, инвестиции в НИОКР, реализацию миссии и видения [3]. Высшее руководство должно нести ответственность за культивирование этих основополагающих принципов и условий.

Интегрированная модель управления эффективностью не может успешно функционировать без эффективного руководства и участия всех уровней персонала. Отделы и подразделения должны быть четко выстроены и иметь ясные цели и задачи, которые соответствуют стратегии и целям всей организации. Каждый сотрудник должен понимать свою роль в достижении целей и участвовать в процессе улучшения качества и эффективности.

Для того чтобы модель была эффективной, необходимо также соблюдение принципа непрерывного улучшения (Continuous Improvement). Организация должна стремиться к постоянному улучшению своих процессов, продуктов и услуг, основываясь на обратной связи от клиентов и рынка. В этом процессе важно участие поставщиков и партнеров, чтобы обеспечить высокое качество и своевременность поставок.

Наконец, для успешного внедрения интегрированной модели управления эффективностью необходимо обеспечить поддержку со стороны высшего руководства и создать мотивирующую среду для всех сотрудников. Это может включать систему вознаграждений и поощрений, обучение и развитие персонала, а также установление четких и достижимых целей и показателей эффективности для всех уровней и отделов организации.

Библиографический список

1. Chabanenko A. V., Yastrebov A. P. Quality Assurance of Hull Elements of Radio-Electronic Equipment by Means of Control System // J. Phys.: Conf. Ser. 1515. 2018. 052065.

2. Обеспечение качества аддитивного производства посредством системы контроля послойного синтеза / А. В. Чабаненко, Е. Г. Семенова, В. О. Смирнова [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 10. С. 75–79.

3. Чабаненко А. В. Управление качеством аддитивных изделий // Стандарты и качество. 2018. № 2. С. 90–94.

УДК 621.313

Н. В. Решетникова*
старший преподаватель
А. Г. Панкратов*
студент
Д. С. Швецов*
студент
И. А. Шишков*
студент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПЛ-072 УЗ

Построены графики магнитной индукции в воздушном зазоре при разных токах якоря. Смоделированы магнитные поля двигателя в различных режимах работы. Приведено сравнение графиков изменения индукции для двигательного и генераторного режима.
Ключевые слова: магнитный поток, магнитное поле, электромеханический преобразователь.

N. V. Reshetnikova*
Senior Lecturer
A. G. Pankratov*
Student
D. S. Shvetsov*
Student
I. A. Shishkov*
Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

MODELING THE MAGNETIC FIELD OF DC MOTOR PL-072 UZ

Graphs of magnetic induction in the air gap at different armature currents are plotted. The magnetic fields of the motor in different modes of operation are simulated. A comparison of induction plots for the engine and generator modes is given.
Keywords: magnetic flux, magnetic field, electromechanical converter.

Введение

В электромеханических преобразователях под действием реакции якоря (влияние магнитного поля обмотки якоря на магнитное поле обмотки возбуждения) происходит изменение намагничивающей силы в стали внутри машины. Данное исследование актуально, так как реакция якоря и взаимодействие полей влияют на смещение геометрической нейтрали, искажение поля под главными полюсами и ухудшение процесса коммутации. Учет данных параметров позволяет получить более точные данные измерений.

Объектом исследования является электромеханический преобразователь ПЛ-072 У3. Цели исследования: смоделировать магнитные поля; построить графики магнитной индукции. Задачи исследования: сравнение экспериментальных и теоретических характеристик; сравнение графиков изменения индукции для двигательного и генераторного режима.

Для исследования магнитного поля электромеханического преобразователя постоянного тока построим графики магнитной индукции для генераторного и двигательного режима в среде Elcut. Пронаблюдаем за распределением линий магнитной индукции внутри двигателя.

Построим модель двигателя (выполнено в программе AutoCAD) (рис. 1) и импортируем модель в Elcut. При моделировании учитываем, что двигатель имеет волновую обмотку. Так как у нас число пазов на якоре 15 и одна пара полюсов, то имеем укороченный шаг обмотки [1].

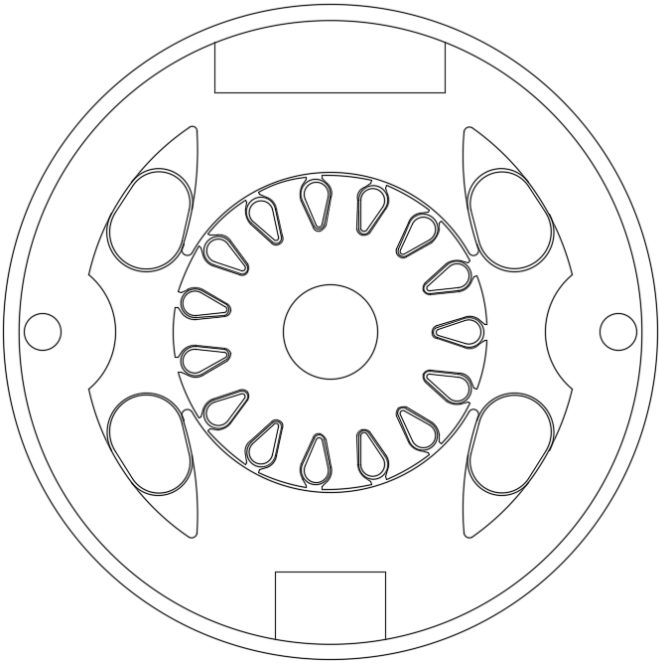


Рис. 1. Модель двигателя

Параметры материалов двигателя: статор – электротехническая сталь 3413; индукция в сердечнике $B_г$ = 1,6–1,7. Кривая намагничивания на рис. 2.

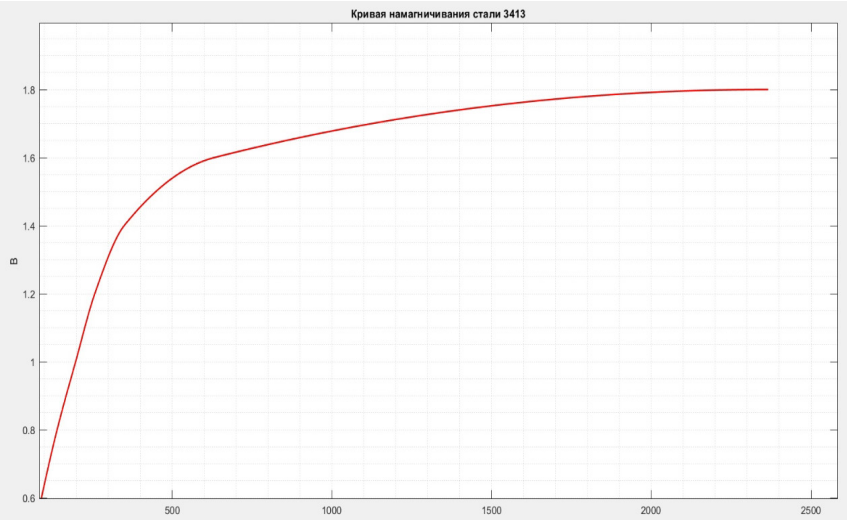


Рис. 2. Кривая намагничивания стали 3413

Ротор – электротехническая сталь 1211. Индукция в сердечнике $B_г$ = =1,35–1,55. Кривая намагничивания на рис. 3.

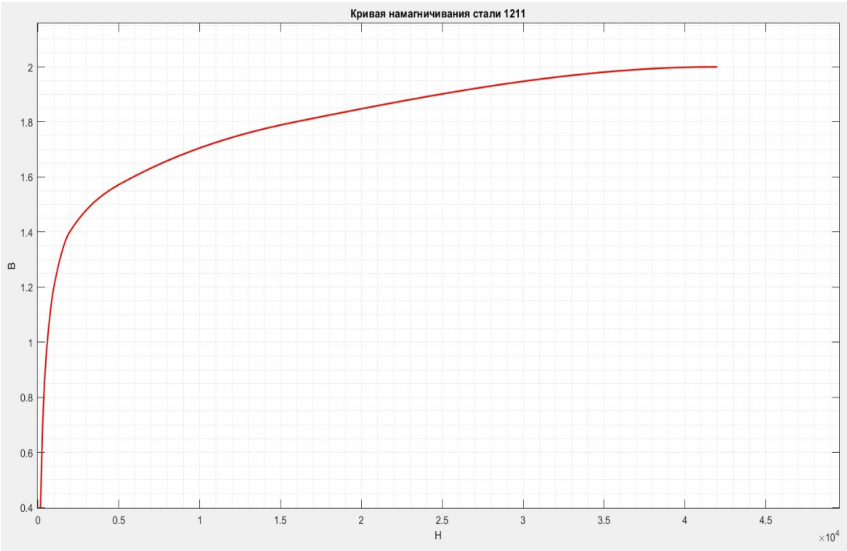


Рис. 3. Кривая намагничивания 1211

Режим холостого хода двигателя показан на рис. 4, 5.

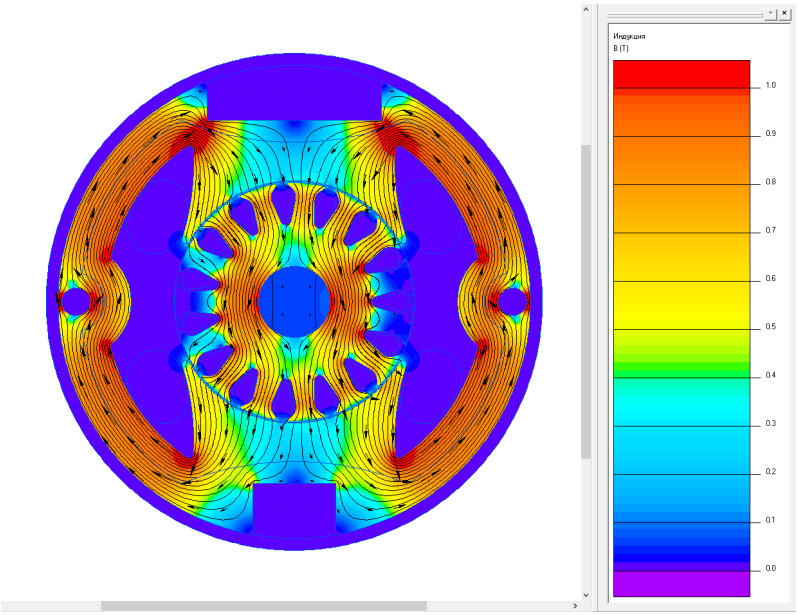


Рис. 4. Расположение линий магнитной индукции при холостом ходе

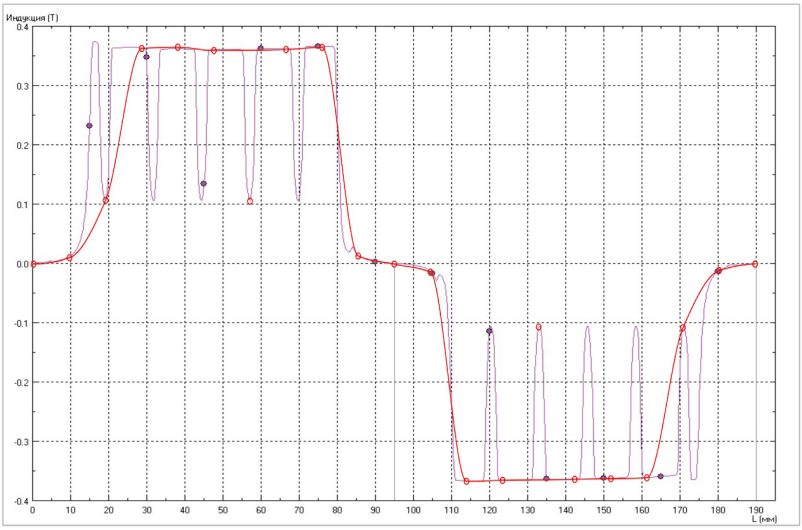


Рис. 5. График индукции на холостом ходе с учетом зубцовых пульсаций

Работа якоря двигателя. Результаты моделирования для двигательного режима. Ток якоря I_a = 0,44 А (рис. 6).

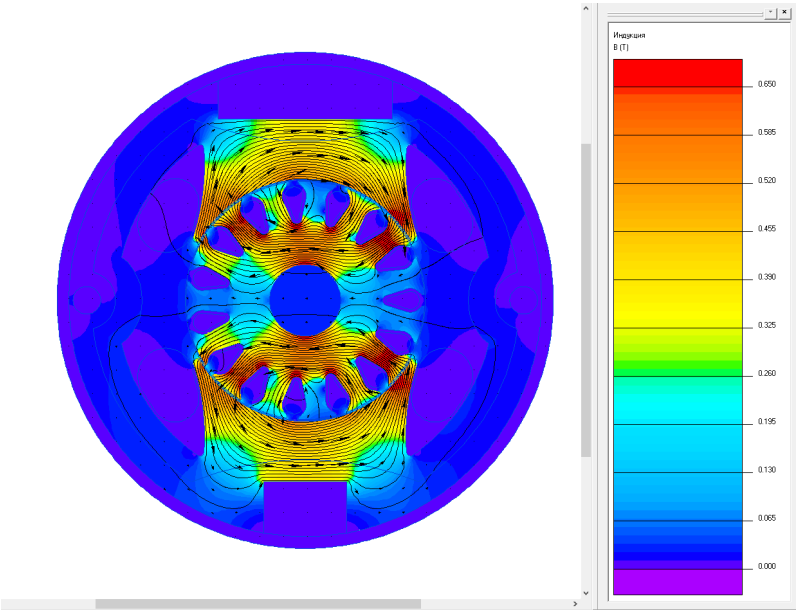


Рис. 6. Расположение линий магнитной индукции при токе только на якоре

Аппроксимированные графики индукции при различных токах якоря представлены на рис. 7.

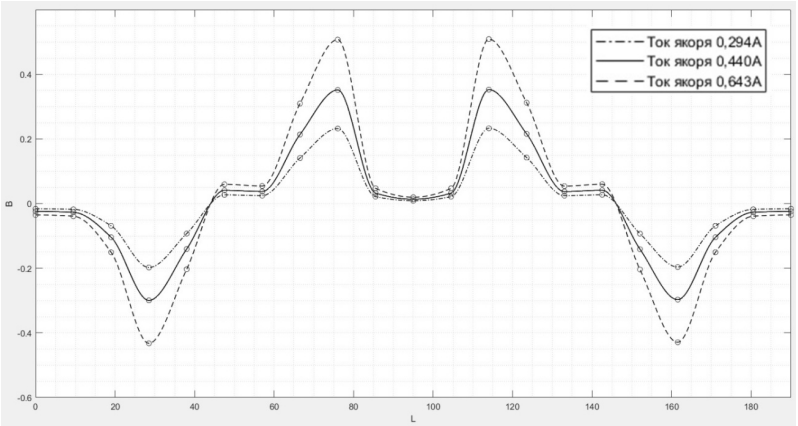


Рис. 7. Графики индукции при токе только на якоре (аппроксимированные)

Номинальный режим двигателя. Результаты моделирования для двигательного режима. Ток якоря I_a = 0,44 А (рис. 8, 9).

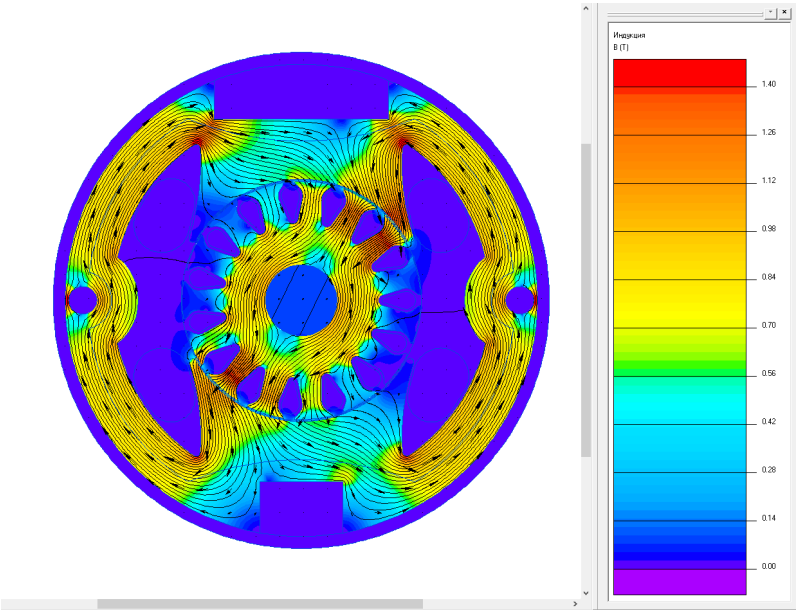


Рис. 8. Результирующее расположение линий магнитной индукции

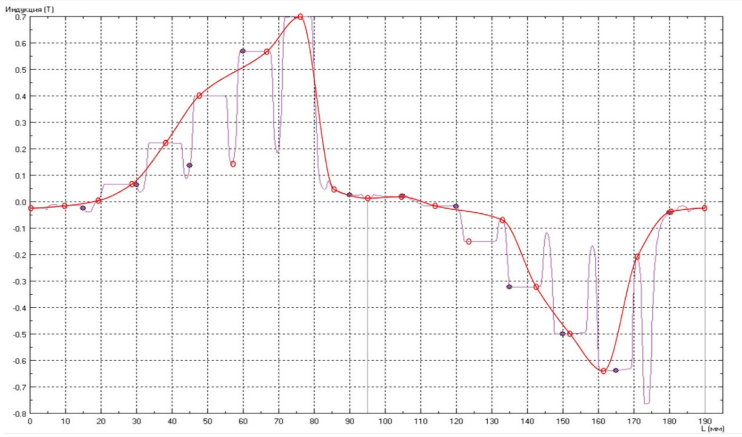


Рис. 9. График индукции результирующий при I_a = 0,44 А с учетом зубцовых пульсаций

Режим холостого хода генератора. Результаты моделирования для генераторного режима. Ток якоря I_a = 0,44 А (рис. 10).

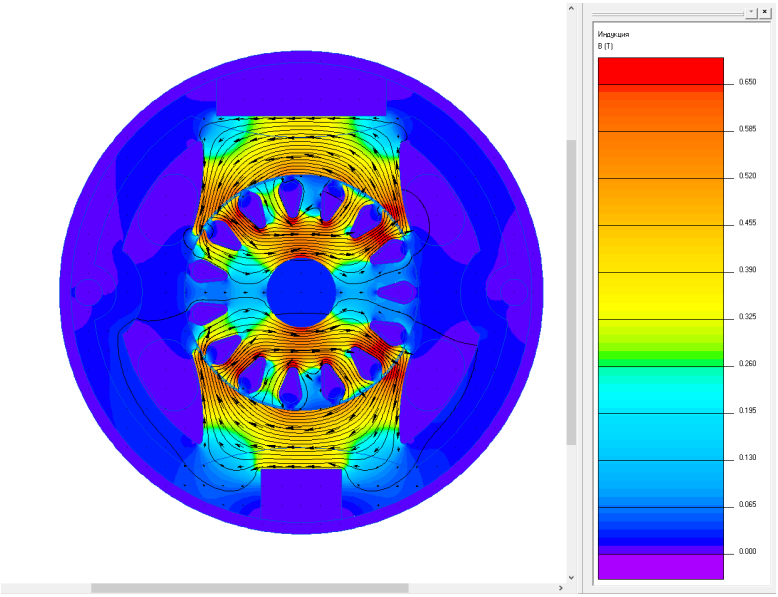


Рис. 10. Расположение линий магнитной индукции

Аппроксимированные графики индукции при различных токах якоря показаны на рис. 11.

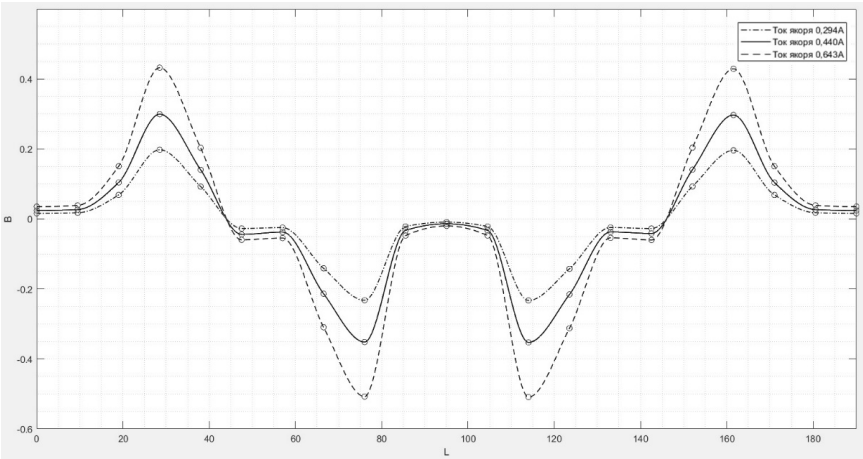


Рис. 11. Графики индукции при токе только на якоре (аппроксимированные)

Номинальный режим генератора. Результаты моделирования для генераторного режима. Ток якоря I_a = 0,44 А (рис. 12, 13).

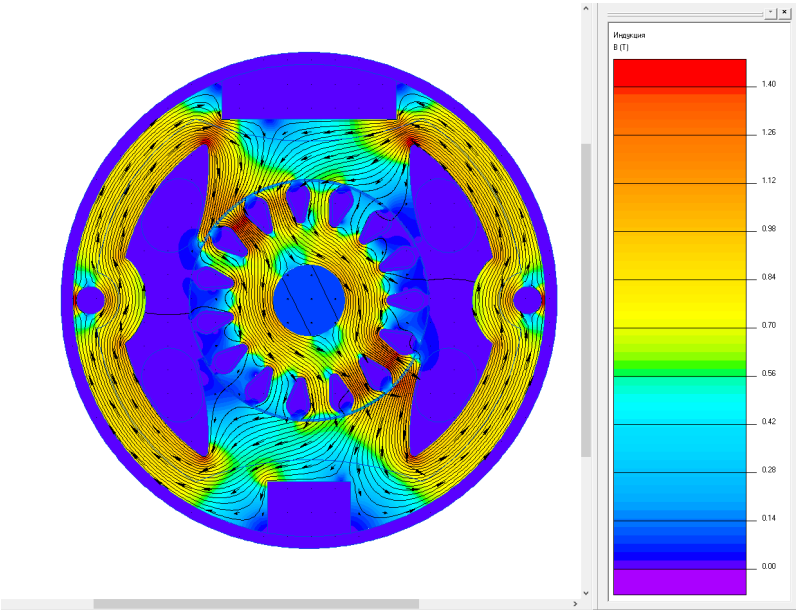


Рис. 12. Расположение линий магнитной индукции при холостом ходе

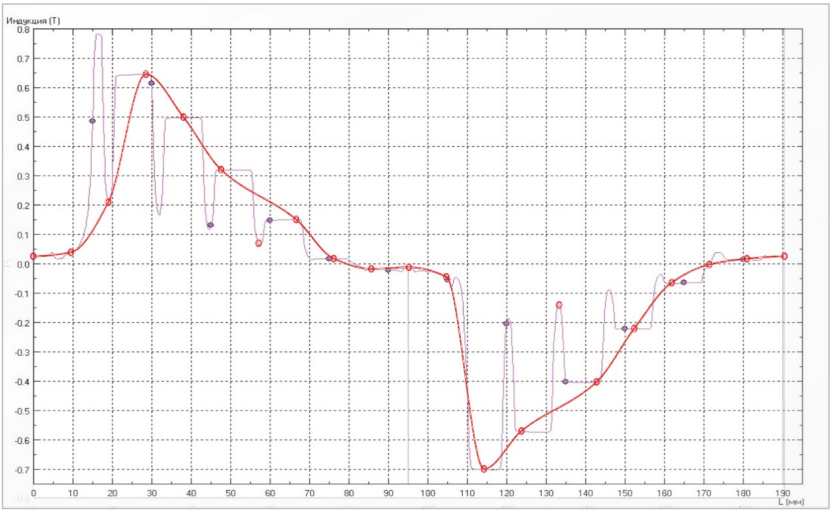


Рис. 13. График индукции результирующий при $I_a = 0{,}44$ А *с учетом зубцовых пульсаций*

Выполним сравнительную характеристику для двигательного режима. Для этого на одной координатной плоскости изобразим график холостого хода и номинального режима (рис. 14).

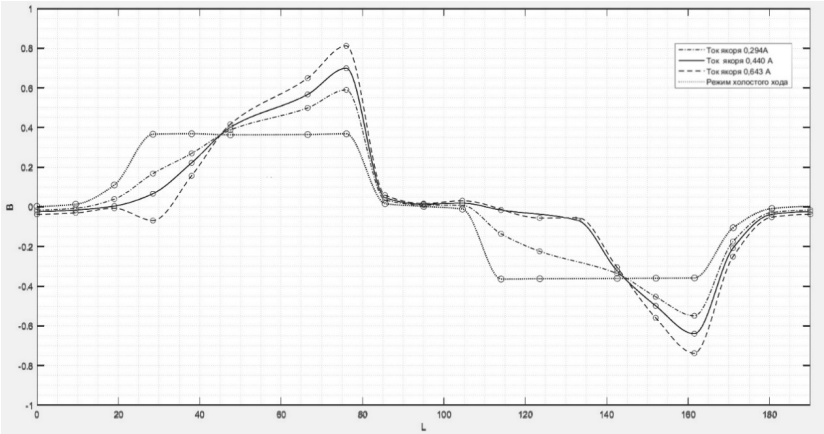


Рис. 14. График сравнения (двигательный режим)

Выполним такое же построение для генераторного режима (рис. 15).

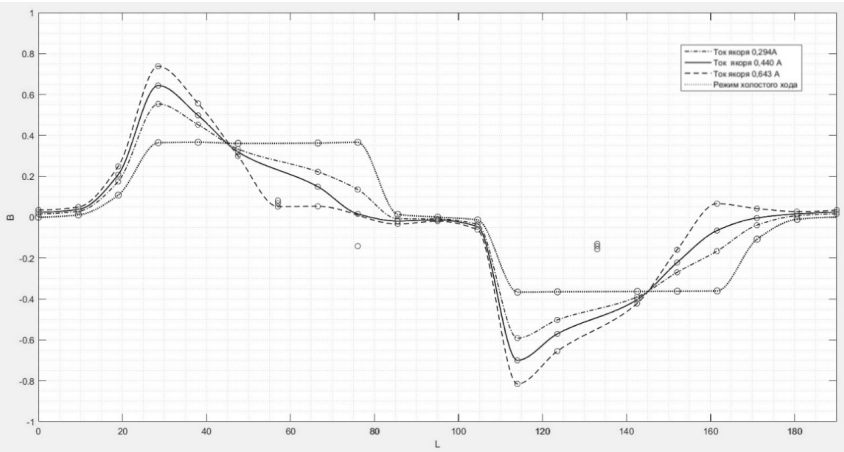


Рис. 15. График сравнения (генераторный режим)

Из графиков видно, что поле якоря искажает поле возбуждения. Изначально симметрично распределенное относительно оси полюсов магнитное поле индуктора (трапециевидной формы) в результирующем состоянии меняет форму под влиянием реакции якоря. В межполюсном промежутке происходит

спад магнитной индукции, связанный с высоким магнитным сопротивлением в данной области [2]. Искажение магнитного поля влечет за собой негативные последствия, связанные с ухудшениями коммутации, в связи с увеличением значения напряжения между коллекторными пластинами.

Заключение

Взаимодействие полей якоря и индуктора влечет негативные последствия при работе электромеханического преобразователя. Реакция якоря ухудшает стабильность работы машины, требует дополнительного учета при проектировании.

Основными причинами зубцовых пульсаций являются неоднородность распределения магнитного поля и качество самих материалов магнитопровода. Наиболее эффективным способом борьбы с вредоносным влиянием служит компенсационная обмотка, укладываемая в пазы полюсных наконечников [3]. Магнитодвижущая сила данной обмотки противоположна действию МДС якоря, тем самым достигается постоянство результирующего магнитного поля электромеханического преобразователя.

Конструкция сердечников обмоток двигателя ПЛ-072 У3 удовлетворяет требованиям, предъявляемым к их намагничиванию (B = 0,7 Тл, при токе якоря I = 0,44 А). При магнитной индукции 1,4 Тл напряженность в зубцах ротора составляет 2500 А/м, это значение оптимальное и не вызывает потерь КПД.

Библиографический список

1. Салова И. А. Моделирование в ELCUT: метод. указ. к выполнению лаборатор. работ. СПб.: ГУАП, 2007. 54 с.

2. Вольдек А. И. Электрические машины. М.: Энергия, 1974. 840 с.

3. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины и микромашины. М.: Высш. шк., 1990. 528 с.

УДК 005.8(075)

К. Н. Тимофеев
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОЕКТОВ НА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Рассмотрена современная нормативная база, регламентирующая вопросы управления качеством при производстве аэрокосмических изделий, применительно к операционной и проектной деятельности; приведены рекомендации по инструментам системы управления качеством, которые целесообразно использовать на приборостроительных предприятиях аэрокосмического комплекса.
Ключевые слова: стандартизация, управление качеством проекта, система менеджмента качества, процессный подход, цикл Деминга, стратегия «6 сигм».

K. N. Timofeev
PhD, Tech., Associate Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

QUALITY MANAGEMENT OF PROJECTS AT INSTRUMENT-MAKING ENTERPRISES OF THE AEROSPACE COMPLEX

The modern regulatory framework regulating the issues of quality management in the production of aerospace products, in relation to operational and design activities, is considered; recommendations are given on the tools of the quality management system, which are advisable to use at the instrument-making enterprises of the aerospace complex.
Keywords: standardization, project quality management, quality management system, process approach, Deming cycle, 6 Sigma strategy.

Процессы развития высокотехнологичных производств в РФ, включающие все этапы от проектирования до серийного изготовления аэрокосмической техники, сопровождаются активной разработкой их стандартизации с применением международной системы управления качеством ISO 9000.

Нормативная база, регламентирующая вопросы управления качеством при производстве аэрокосмических изделий, достаточно подробно рассмотрена в документах ГОСТ Р ИСО 9001, ГОСТ РВ 15.002, AS 9100, ГОСТ РВ 15.002; ОСТ 1 02773 и 21.2 С «Руководство по сертификации и надзору за производством изделий авиационной техники». Следует также отметить разработку внутренних документов по управлению качеством производства отдельными крупными компаниями, например ОАО «КнААПО», примененных в том числе при производстве элементов регионального самолета SukhoiSuperjet-100 и изделий военной авиатехники пятого поколения, что позволило обеспечить достаточно высокое качество продукции. В настоящий момент широкое примене-

ние приобрело использование процессного подхода в операционной деятельности, в том числе при управлении качеством на приборостроительных предприятиях аэрокосмического комплекса (АКК) с применением стандартов ГОСТ Р ЕН 9100–2011 «Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонных отраслей промышленности. Требования». Качество процессов во время операционной деятельности производства продукции должно обеспечиваться и достигаться на основе постоянного улучшения в соответствии с циклом Деминга (PDCA), который включает планирование, проведение, проверку и корректирующие действия, что и обеспечивает достижение поставленных предприятием целей. Такой подход целесообразно использовать при разработке внутренних систем менеджмента качества (СМК) приборостроительных предприятий, опираясь в том числе на ГОСТ Р ИСО 9001:2015 «Система менеджмента качества. Требования».

В проектной деятельности, так же как и в операционной, на приборостроительных предприятиях АКК в настоящий момент применяется процессорный подход, при котором укрупненно рассматриваются две группы процессов [1]:

- процессы, обеспечивающие управление содержанием работ проекта;
- процессы, направленные на создание конкретных образцов техники.

В высокотехнологичных проектах, к которым относятся и проекты, выполняемые на предприятиях АКК, эти группы процессов часто накладываются и взаимодействуют друг с другом. Это связано с тем, что цели проекта часто не могут быть определены, прежде всего в количественном выражении, при отсутствии понимания того, как создать новое изделие. Однако следует разделять цели проекта, т. е. мероприятия (иногда используется термин «задачи»), обеспечивающие организацию производства конкретного изделия, и цели создания собственно изделия с заданными характеристиками согласно техническому заданию (ТЗ).

На приборостроительных предприятиях АКК активно используется стратегия «6 сигм» [2], на базе которой создаются инструменты управления качеством процессов и методы оценки заявленного качества изделий. Инструментом управления качеством отдельных высокотехнологичных проектов может являться «проектный треугольник», который представляет прогресс проекта через три ограничения: состав задач, календарь, затраты – посредством которых можно управлять и оценивать качество проекта или изделия. Применение «проектного треугольника» [3] рассмотрено в различной литературе, в том числе в китайском Своде знаний по управлению проектами (China PMBoK).

Проектная деятельность на предприятиях АКК основывается на соответствующих нормативных документах, согласованных с общенациональными стандартами, в том числе ГОСТ Р 58876–2020 «Системы менеджмента качества организации авиационной, космической и оборонной промышленности». Структурная схема основных стандартов по управлению проектной деятельностью в РФ представлена на рис. 1.

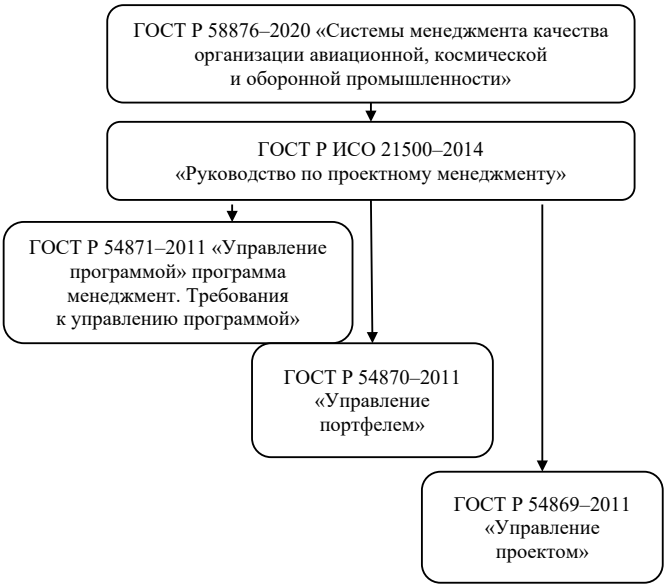


Рис. 1. Основные стандарты по управлению проектной деятельностью в РФ

В каждом из четырех приведенных на рис. 1 ГОСТов по управлению проектами рассмотрены вопросы том числе по управлению их качеством. Наиболее детально рекомендации по управлению качеством проектов изложены в ГОСТ Р ИСО 21500–2014 (разд. 4.3.32–4.3.44), где соответственно описаны вопросы планирования, обеспечения и контроля качества исполняемых проектов. При реализации проекта для каждого раздела предлагается формировать входные и выходные данные, план по качеству, метрики качества, информацию о выполнении работ, запросы на изменения и корректирующие действия. Раздел 4.3.34, посвященный важному вопросу организации контроля качества проекта, рассмотрен достаточно подробно: «Назначение процесса контроля качества состоит в определении того, достигнуты ли результаты проекта, соблюдены ли требования в области качества и обеспечено ли соответствие стандартам» [4].

Контроль качества исполнения высокотехнологичного проекта на предприятиях АКК – это процесс мониторинга и верификации результатов исполнения задач проекта по управлению его качеством. Основное назначение этого раздела проектной деятельности – фиксация того, что качество исполнения отдельных задач и проекта в целом соответствуют ТЗ, утвержденному заказчиком. Контроль качества и внесение необходимых изменений, согласно процессорному стандарту, осуществляются на протяжении всего жизненного цикла проекта. В отдельных ГОСТах, рассматривающих управление проектом, портфелем и программой (см. рис. 1), вопросы управления качеством проекта подробно не рассматриваются.

Применительно к проектированию сложных аэрокосмических изделий использование процессорного подхода сложно переоценить. В рамках процесса проектирования сначала создается общая структура системы и затем она детализируется на совокупность компонентов и узлов, характеризующихся их функциональным назначением в этой структуре, а также определяются параметры этих компонентов. Параллельно с проектированием применяется процесс управления качеством проекта (УКП), портфеля или программы приборостроительного предприятия.

Алгоритм процессов инициации и разработки проекта аэрокосмического изделия с отражением УКП представлен на рис. 2.

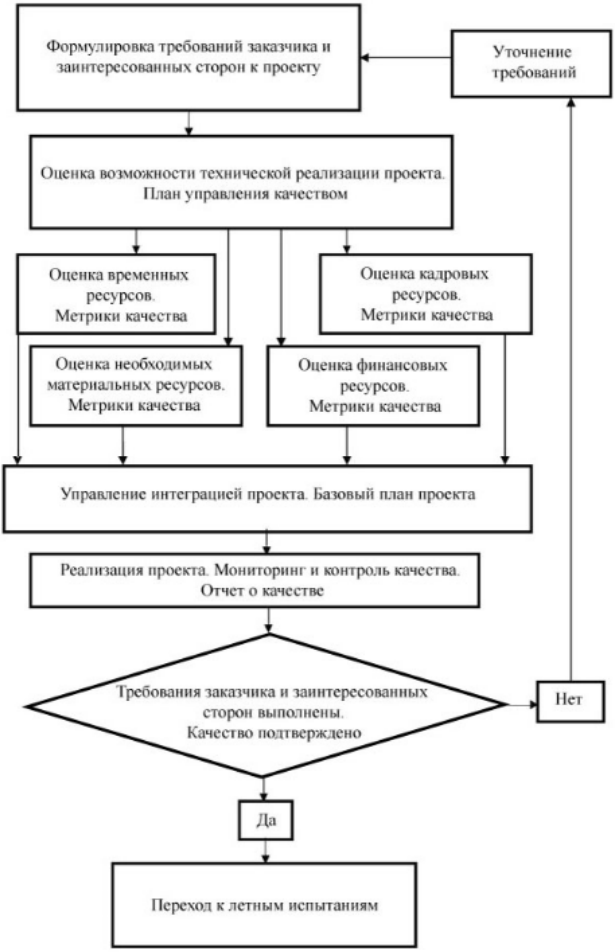


Рис. 2. Алгоритм процессов инициации и разработки проекта аэрокосмического изделия

Алгоритм реализует итерационную структуру для оптимизации конфликтующих требований возникающих при реализации проекта. Методически это согласуется с требованиями стандарта PMBOK 7, рекомендующего использование гибкой методологии проектного управления [5].

Библиографический список

1. Небылов А. В., Тимофеев К. Н. Управление аэрокосмическими проектами: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2022. 59 с.
2. Холп Л., Панде П. Что такое «Шесть сигм»? Революционный метод управления качеством. М.: Альпина Паблишер. 2006. 158 с.
3. Lu Y. J., Wang S. Q. Project Management in China // Southeast Asia Construction. 2004. Iss. Sept. Oct. P. 158–163.
4. ГОСТ Р ИСО 21500–2014 «Руководство по проектному менеджменту». URL: https://docs.cntd.ru/document/1200118020 (дата обращения: 14.03.2023).
5. Руководство PMBOK. Седьмое издание. Newtown Square, Pennsylvania: Project Management Institute, Inc. 2021. 374 p.

УДК 621

А. В. Чабаненко
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

МОДЕЛЬ ПОДАЧИ ПОЛИМЕРА В ПРОЦЕССЕ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА

Для контроля и оптимизации процесса послойного синтеза необходимо использовать модели движения филамента внутри экструдера. Процесс послойного синтеза – один из самых распространенных методов 3D-печати. В этом процессе филамент пластика (обычно PLA или ABS) расплавляется и депонируется на поверхности, создавая 3D-модели по слоям. Модель подачи филамента – одна из ключевых частей FFF-принтера. Она отвечает за передачу филамента от катушки к головке принтера, где филамент расплавляется и депонируется на поверхность.
Ключевые слова: аддитивные технологии, контроль, улучшение, филамент.

A. V. Chabanenko
PhD, Tech., Associate Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

MODEL OF POLYMER SUPPLY IN THE PROCESS OF LAYER-BY-LAYER SYNTHESIS

To control and optimize the process of layer-by-layer synthesis, it is necessary to use models of the movement of the filament inside the extruder. The layer-by-layer process is one of the most common 3D printing methods. In this process, a filament of plastic (usually PLA or ABS) is melted and deposited on a surface, creating 3D patterns layer by layer. The filament feed model is one of the key parts of the FFF printer. It is responsible for transferring the filament from the spool to the printer head, where the filament is melted and deposited on the surface.
Keywords: additive technologies, control, improvement, filament.

Введение

Послойный синтез (англ. layer-by-layer additive manufacturing) – это метод изготовления 3D-объектов путем последовательного наложения слоев материала. Процесс может осуществляться с использованием различных материалов, таких как пластик, металлы, керамика и др.

Для контроля и оптимизации процесса послойного синтеза могут использоваться цифровые модели. Они могут быть созданы на основе компьютерного проектирования (CAD) или 3D-сканирования. Они могут представлять собой геометрическую модель объекта или модель процесса синтеза, которая учитывает физические характеристики материалов, параметры печати и другие факторы [1].

Цифровая модель подачи фламина – одна из возможных моделей процесса послойного синтеза для печати с использованием пластикового филамента. Она описывает путь движения филамента во время печати, включая скорость и

температуру плавления материала. Такая модель может помочь оптимизировать параметры печати, улучшить качество и точность печати, а также сократить время печати.

Цифровая модель подачи филамента может быть создана с помощью специализированного программного обеспечения для 3D-печати. Она может включать такие параметры, как скорость подачи филамента, температура экструдера, температура стола для печати, высота слоя, толщина стенок и заполнение объекта.

Кроме того, для создания качественной цифровой модели подачи филамента могут использоваться данные, полученные в результате экспериментов и опыта производителя пластикового филамента. Это может включать данные о наилучших параметрах печати для конкретных типов филаментов, а также рекомендации по использованию материалов различной жесткости, цвета и других характеристик.

Использование цифровых моделей подачи филамента может помочь производителям 3D-принтеров и пользователей улучшить качество печати и снизить количество отходов. Это может быть особенно полезно в производственной среде, где производство большого количества деталей может потребовать оптимизации параметров печати и сокращения времени производства.

Таким образом, цифровые модели подачи филамента могут стать важным инструментом для повышения эффективности и качества процесса послойного синтеза. Кроме того, цифровая модель подачи филамента может быть использована в целях оптимизации печатных процессов для различных типов филаментов. Например, для некоторых материалов может потребоваться более высокая температура экструдера, а для других – более низкая. Также параметры скорости и толщины слоя могут различаться для разных материалов.

Важный аспект при создании цифровой модели подачи филамента – проверка ее работоспособности. Это может быть выполнено путем создания прототипа и проведения тестов печати, чтобы убедиться, что параметры печати соответствуют заданным и детали печатаются с высокой точностью и качеством. Кроме того, цифровая модель подачи филамента может быть улучшена путем использования машинного обучения. Например, с помощью алгоритмов машинного обучения можно определить оптимальные параметры печати для конкретного филамента на основе большого количества данных, полученных из опытов и тестов.

В целом использование цифровых моделей подачи филамента может помочь повысить качество и точность процесса послойного синтеза, а также улучшить эффективность производства.

Еще одним преимуществом использования цифровых моделей подачи филамента является возможность создания сложных деталей с высокой точностью и качеством. Например, при использовании сложных геометрических форм, которые сложно получить с помощью других технологий, цифровая модель позволяет точно контролировать подачу филамента, что обеспечивает точность и качество детали.

Цифровая модель подачи филамента может быть адаптирована для различных 3D-принтеров и типов экструдеров. Это позволяет производителям печатных материалов разрабатывать универсальные модели, которые могут использоваться с различными типами оборудования, что повышает их конкурентоспособность на рынке.

Наконец, использование цифровых моделей подачи филамента может помочь производителям и пользователям 3D-принтеров более точно оценивать стоимость производства. С помощью точно настроенной модели можно более точно определить необходимое количество филамента, время печати и другие параметры, что позволяет снизить издержки и повысить эффективность производства.

В целом цифровые модели подачи филамента (рис. 1) – важный инструмент для производства высококачественных деталей с использованием 3D-печати. Они позволяют точно контролировать параметры печати и повышать эффективность производства, что в итоге может привести к снижению стоимости производства и улучшению конкурентоспособности продукции [2].

Рис. 1. Сопло аддитивной установки

Поле выбора подходящего полимера проводится имитационное моделирование на физические свойства. Данные записывались в Excel-файлы, которые использованы для ввода в программах FE, таких как Abaqus Unified FEA. Входные данные для Abaqus направлялись в анализ напряжений и пластической деформации в различных температурных средах. Определены участки номиналь-

ных напряжений при различных температурных режимах. Это позволяет спрогнозировать, для каких температурных режимов предназначен корпус РЭА, выполненный из различных композиционных материалов.

Для успешного применения композиционных материалов необходимо учитывать упрощенную схему внутренней части головки аддитивной установки (рис. 2).

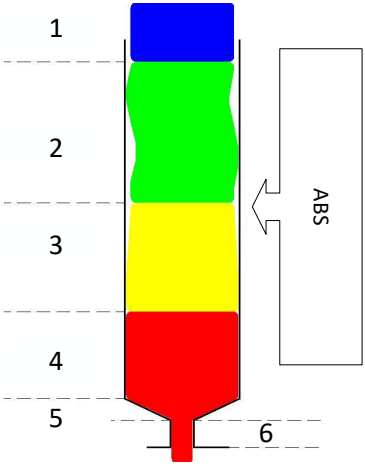


Рис. 2. Структура процесса филаментизации полимера

Участок 1. Имеется поступающий холодный полимер. Его свойства еще не изменились от нагрева, поэтому его сопротивление движению определяется трением о стенки.

Участок 2. Зеленого цвета. В этой части полимер уже несколько нагревается от стенок и механические свойства его ухудшаются, однако текучесть еще не проявляется.

Участок 3. Температура становится выше, и начинается пластическая деформация прутка. Под давлением он раздается в стороны, образуя поршень.

Участок 4. В этой зоне полимер должен проплавляться до самого центра, т. е. полностью. В противном случае, если к соплу подходит не расплавившийся сердечник, наблюдается неравномерность выдавливания пластика. Такое явление хорошо наблюдалось с полимером 1,7–1,8 мм и диаметром сопла 1 мм при скорости подачи полимера 490–900 мм/мин.

Участок 5. Зона сжатия потока. Форма и длина этого участка не слишком важны: чем меньше длинна данного участка, тем лучше.

Участок 6. Окончание сопла. Наконечник до 0,45 мм. Это участок с самым большим сопротивлением, поэтому его длина очень влияет на сопротивление. При длине 0,45 мм и диаметре сопла 0,25 мм, как оказалось, 48% всего сопротивления приходится на долю этого участка. Необходимо учитывать, что

удлинение этого участка ведет не только снижению скорости, но и оказывает сглаживающее действие на подачу полимера, сокращая раздутие на больших скоростях [3].

Библиографический список

1. Chabanenko A. V., Yastrebov A. P. Quality Assurance of Hull Elements of Radio-Electronic Equipment by Means of Control System // J. Phys.: Conf. Ser. 1515. 2018. 052065.

2. Рассыхаева М. Д., Чабаненко А. В. Внедрение информационной PLM системы в организации // Избранные научные труды двадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством». М., 2021. С. 285–289.

3. Чабаненко А. В. Управление качеством аддитивных изделий // Стандарты и качество. 2018. № 2. С. 90–94.

УДК 005.6

А. В. Чабаненко*
кандидат технических наук, доцент
М. Д. Рассыхаева*
ассистент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ИНТЕГРИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ПРОГРАММЫ TQM И SIX-SIGMA В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Рассмотренная интегрированная модель программы TQM (Total Quality Management) и Six-Sigma в аддитивном производстве может помочь организациям повысить качество продукции и эффективность производственных процессов. TQM является стратегией управления качеством, которая ориентирована на улучшение процессов и удовлетворение потребностей клиентов. Она включает использование стандартов качества, постоянное обучение сотрудников и взаимодействие с клиентами и поставщиками.
Ключевые слова: TQM, структурирование производственных процессов, индустрия 4.0, цифровое производство, качество, аддитивные технологии.

A. V. Chabanenko*
PhD, Tech., Associate Professor
M. D. Rassykhaeva*
Assistant
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

INTEGRATED TQM AND SIX-SIGMA PROGRAM MODEL IN ADDITIVE MANUFACTURING

The article discusses the integrated model of the TQM (Total Quality Management) program and Six-Sigma in additive manufacturing can help organizations improve product quality and the efficiency of production processes. TQM is a quality management strategy that focuses on process improvement and customer satisfaction. It includes the use of quality standards, continuous employee training and interaction with customers and suppliers.
Keywords: TQM, structuring of production processes, industry 4.0, digital manufacturing, quality, additive technologies.

Введение

Six-Sigma – это методология управления качеством, которая использует статистические методы и инструменты, чтобы уменьшить количество дефектов и улучшить процессы. Она также ориентирована на повышение уровня удовлетворенности клиентов и увеличение эффективности производства.

Интеграция TQM и Six-Sigma может помочь организациям достигнуть следующих целей в аддитивном производстве.

1. Повышение точности и надежности производственных процессов. Использование методов Six-Sigma позволяет улучшить точность производственных процессов и уменьшить количество дефектов. TQM помогает убедиться в том, что процессы являются надежными и повторяемыми.

2. Уменьшение времени на производство. Интеграция TQM и Six-Sigma позволяет оптимизировать производственные процессы и уменьшить время на производство продукции.

3. Увеличение удовлетворенности клиентов. Использование методов Six-Sigma и TQM позволяет организациям удовлетворить потребности клиентов и улучшить их опыт взаимодействия с компанией.

4. Улучшение качества продукции. Использование методов Six-Sigma и TQM позволяет организациям улучшить качество продукции и уменьшить количество дефектов.

Интеграция TQM и Six-Sigma может помочь организациям достичь лучших результатов в аддитивном производстве, увеличить удовлетворенность клиентов и повысить эффективность производственных процессов, помочь организациям повысить эффективность использования ресурсов и уменьшить количество бракованной продукции, что может привести к экономии затрат на производство [1].

Внедрение в аддитивное производство

Для успешной интеграции TQM и Six-Sigma в аддитивном производстве необходимо учитывать некоторые особенности этой технологии. Например, аддитивное производство характеризуется высокой степенью комплексности и трудностями в контроле процессов, которые могут повлиять на качество продукции.

Для устранения этих проблем организации могут использоваться следующие методы.

1. Оптимизация процессов. Необходимо оптимизировать процессы аддитивного производства с помощью инструментов Six-Sigma, таких как DMAIC (определение, измерение, анализ, улучшение и контроль).

2. Мониторинг. Организации могут использовать методы мониторинга, такие как наблюдение за параметрами процессов, мониторинг качества продукции и т. д., для предотвращения возможных проблем.

3. Повышение квалификации сотрудников. Сотрудники должны обладать высокой квалификацией и знать особенности аддитивного производства, чтобы эффективно использовать инструменты TQM и Six-Sigma [2].

Интеграция TQM и Six-Sigma в аддитивном производстве – сложный, но эффективный способ повышения качества продукции, улучшения эффективности производственных процессов и удовлетворения потребностей клиентов. Она требует значительных усилий и инвестиций, но может принести значительные выгоды в долгосрочной перспективе (рис. 1).

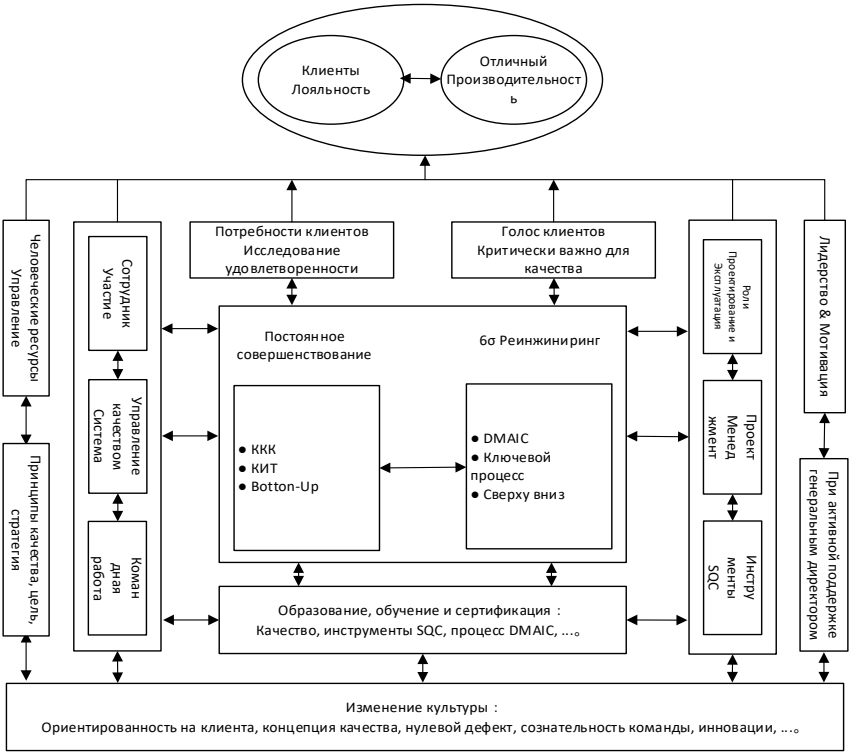


Рис. 1. Интегрированная модель программы TQM и Six-Sigma

Эти конструкты и включающие их пункты имеют причинно-следственную связь. Пункты конструкта «фундаментальное поле» повлияют на развитие элементов конструкта «движущие силы». Эффективное внедрение систем в конструкте «движущие силы» может привести к результатам по пунктам конструкта «основная конкурентоспособность». В результате элементы конструкта «сила роста» будут иметь наилучшие показатели. Эти взаимосвязи отражены на рис. 2.

Интеграция TQM и Six-Sigma в аддитивном производстве (рис. 3) может помочь организациям достичь высоких стандартов качества и эффективности производства. Это может привести к повышению конкурентоспособности организации и улучшению удовлетворенности клиентов.

Методология шести сигм основана на статистических методах и позволяет снижать уровень дефектности до значения, соответствующего 3,4 дефекта на миллион возможностей (DPMO) [3]. Это означает, что в процессе производства почти все продукты будут соответствовать требованиям заказчика, а уровень отбраковки будет минимальным.

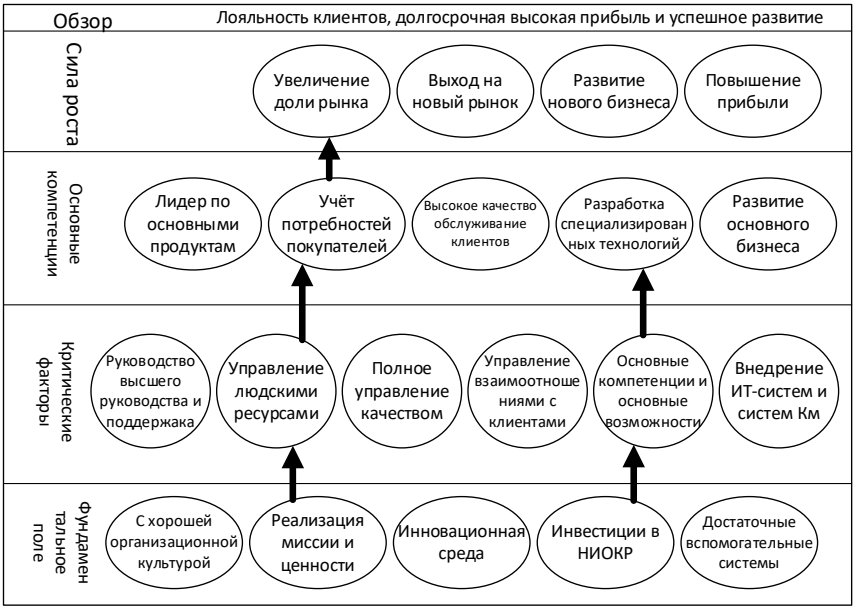


Рис. 2. Стратегическая карта долгосрочного развития предприятия

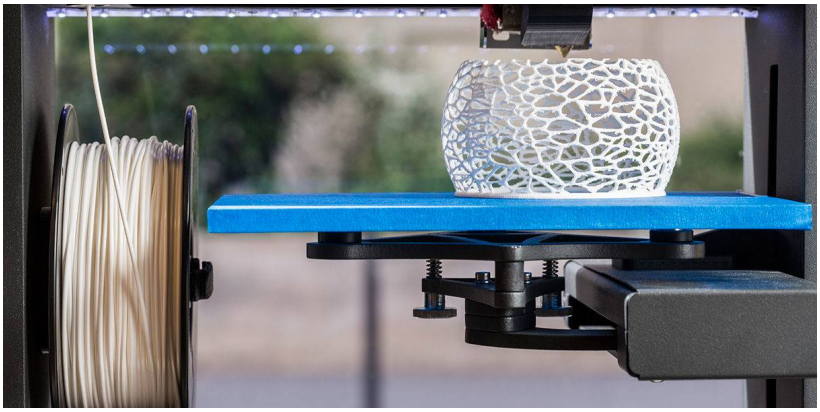


Рис. 3. Аддитивное производство

Применение методологии шести сигм в аддитивном производстве позволяет достичь высокого качества продукции, уменьшить количество дефектов и сократить затраты на отбраковку и повторную работу. Для этого необходимо провести анализ и оптимизацию процессов производства, разработать систему контроля качества и обучить персонал методикам шести сигм.

Библиографический список

1. Chabanenko A. V., Yastrebov A. P. Quality Assurance of Hull Elements of Radio-Electronic Equipment by Means of Control System // J. Phys.: Conf. Ser. 1515. 2018. 052065.

2. Обеспечение качества аддитивного производства посредством системы контроля послойного синтеза / А. В. Чабаненко, Е. Г. Семенова, В. О. Смирнова [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 10. С. 75–79.

3. Чабаненко А. В. Управление качеством аддитивных изделий // Стандарты и качество. 2018. № 2. С. 90–94.

.

ВСТРОЕННЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.021

А. Ю. Петров
аспирант
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ПРОГРАММНЫХ РЕСУРСОВ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрены некоторые из существующих методов разделения программных ресурсов в современных вычислительных сетях. Задача статьи – обзор методов и сравнительный анализ полученных после тестирования результатов. Сравнение методов происходит по двум критериям – эффективности выполнения поставленной задачи и скорости ее достижения.
Ключевые слова: разделение программных ресурсов, алгоритмы, метод многоуровневого разбиения графов, метод моделированного отжига, метод гибридного алгоритма.

A. Yu. Petrov
PhD Student
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

EXISTING METHODS FOR SOFTWARE PARTITIONING IN COMPUTING SYSTEMS

The article reviews some existing methods for Software partitioning in modern computing networks. The purpose of the article is to review the methods and to analyze the results obtained after testing. The comparison of methods is based on two criteria, there are the efficiency of the task and the speed of its achievement.
Keywords: software resource partitioning, algorithms, multi-level graph partitioning, simulated annealing, hybrid algorithm.

Введение

Современный человек, постоянно окруженный технологическими сетями различной сложности, в полной мере не осознает, что позволяет этим сетям продуктивно работать. Ответом же на этот вопрос будет эффективное распределении программных ресурсов.

В сети, разделяемой огромным числом узлов, количество программных ресурсов, доступное для каждой программной среды, может различаться в зависимости от того, как в данный момент они расходуются. Задача современного инженера – распределить эти ресурсы таким образом, чтобы вся вычислительная сеть работала наиболее эффективно. Цель работы – обзор и анализ некоторых наиболее применяемых в сфере проектирования сетей методов разделения программных ресурсов в вычислительных системах.

Методы распределения программных ресурсов

Разделение программных ресурсов расширяет возможности программного обеспечения по управлению компонентами сети, улучшая и ускоряя происходящие внутри нее процессы.

Оптимизация распределения ресурсов в сети требует, чтобы при моделировании самой сети все ее компоненты были наглядно представлены, а накладные расходы на обмен данными между различными узлами были минимизированы. Эта проблема может быть смоделирована как проблема разбиения графа, где взвешенный граф программных компонентов должен быть разбит на ряд частей, представляющих доступные узлы. В частности, для решения задачи распределения во времени, необходимо решить задачу быстрым алгоритмом. Разбиение графов является фундаментальной проблемой во многих областях информатики, таких как проектирование СБИС, параллельная обработка и распределение нагрузки. Проблема разбиения графа решает задачу разделения графа на равные множества при минимизации ребер между множествами [1].

Представим сеть как неориентированный граф со множеством вершин и множеством ребер, соединяющих вершины. Вершины представляют собой единицы развертывания в распределенной программной системе, а ребра – коммуникационные затраты между этими единицами. Каждой вершине присваивается стоимость, которая указывает на количество ресурсов. Вес ребра представляет собой стоимость коммуникации (т. е. пропускную способность) между различными программными компонентами.

В наше время существует немало алгоритмов в области разбиения графов. Первую их часть занимают алгоритмы на основе перемещений, которые пытаются итеративно улучшить разбиение путем перемещения вершин или обмена между частями, например алгоритм Кернигана – Лина (KL) [2]. Выбирая перемещения, которые приводят к уменьшению стоимости разреза графа, этот алгоритм сходится к локальному оптимуму. Фидучча и Маттейз внесли ряд оптимизаций в алгоритм KL, что привело к созданию алгоритма линейного времени для разбиения графа. Эти алгоритмы, основанные на движении, могут быть объединены со стохастическими методами, описанными в работе [3], такими как имитационный отжиг, оптимизация роя частиц или оптимизация муравьиной колонии. Самым большим недостатком итерационных методов улучшения является то, что их производительность ухудшается по мере увеличения размера графов.

Для разбиения больших графов широкое распространение получил многоуровневый подход [4–5]. Основная идея заключается в итеративном огрублении исходного графа путем слияния вершин в соответствии с соответствием до тех пор, пока не останется небольшой граф с похожей структурой. Многоуровневая схема также используется в современных библиотеках разбиения графов, таких как SCOTCH [6] или METIS [7]. Последние работы в области разбиения графов исследуют методы, основанные на диффузии [8] или максимальном потоке [9].

Все эти методы разбивают граф на заранее определенное количество частей одинакового размера. В контексте сетей не все узлы имеют равную производительность, а также количество узлов, которые должны быть использованы, не предопределено, поэтому эти алгоритмы не могут быть использованы очевидным способом. Для исследования будут взяты и проанализированы алгоритмы многоуровневого разделения и алгоритм имитационного отжига, а также их гибридная версия.

Метод многоуровневого разбиения графов (MLKL)

Первым методом для исследования был выбран метод многоуровневого разбиения графов (MLKL). Данный подход впервые был предложен Б. Хэндриксоном и Р. Лиландом в работе, посвященной разбиению графов [10].

Суть данного алгоритма заключается в том, чтобы огрубить граф через объединение связанных вершин до получения небольшого графа. После этого граф разбивается на части и заново разукрупняется, при этом оптимизируя разбиение на каждом разукрупнении. Таким образом, мы получаем этапы – огрубление, начальное разбиение, разбор и уточнение.

При огрублении из начального графа создается граф с меньшим количеством вершин путем сворачивания ребер и объединения вершин, соединенных этими ребрами. Когда ребро сворачивается, две вершины, соединенные ребром, уменьшаются до одной, вес которой равен сумме весов обеих вершин. Если обе вершины имеют ребро к третьей вершине, эти два ребра сворачиваются в одно ребро с суммированным весом ребра. На каждой итерации огрубления создается соответствие – набор ребер без общих вершин – и совпадающие вершины объединяются. Для того чтобы найти небольшой срез ребра, выгодно свернуть ребра с большим весом, так как они вряд ли попадут в лучший срез. Алгоритм огрубления использует популярный метод огрубления – алгоритм Heavy-edge matching (HEM) [7]. Вершины графа посещаются в случайном порядке, и каждая вершина сопоставляется с несопоставленным соседом таким образом, чтобы вес ребра был максимальным по всем допустимым инцидентным ребрам. Для того чтобы иметь возможность отображать вершины самого грубого графа на различных машинах, мы добавили еще одно ограничение – сопоставлять две вершины только тогда, когда сумма весов их вершин меньше размера наименьшей части.

При начальном разбиении задача состоит в выборе целесообразного развертывания программных компонентов на имеющейся инфраструктуре. Предполагается, что у нас имеется достаточно узлов сети и ресурсов, чтобы найти такое развертывание. Эта проблема сводится к простой задаче упаковки контейнеров, которая может быть решена с помощью алгоритма первой подгонки. Вершины упорядочены по убыванию веса вершины, а узлы – по убыванию максимальной мощности. Для каждой вершины список узлов итерируется, и она назначается первой, у которой осталось достаточно мощности, а мощность этого узла уменьшается с весом этой вершины [10].

На последнем этапе граф снова постепенно распутывается, для улучшения начального разбиения, найденного на предыдущем этапе, применяется KL-подобный алгоритм. Данный алгоритм основан на алгоритме уточнения Хендриксона. Основополагающей идеей служит концепция выигрыша, связанного с перемещением вершины в другую часть. Выигрыш отражает чистое изменение размера разреза, которое произойдет в результате переключения вершины с одного станка на другой. Базовый алгоритм уточнения состоит из двух циклов. Каждый проход внешнего цикла пытается переместить вершины, чтобы найти лучший срез. Этот внешний цикл заканчивается после прохода, который не улучшил лучшее разбиение на данный момент, что означает, что алгоритм достиг локального оптимума. Внутренний цикл будет итеративно выбирать вершину для перемещения, т. е. вершину с наибольшим выигрышем, с учетом некоторых дополнительных правил. При перемещении вершины выигрыши всех ее соседей должны быть обновлены. Этот процесс завершается, когда не найдено более подходящее перемещение [10].

Когда лучшее разбиение найдено, внутренний цикл будет принимать перемещения только с положительным коэффициентом усиления, а затем начнется новый проход. Когда два возможных хода имеют равный выигрыш, мы предпочитаем ходы, которые не выходят за границу целевой части. Если это не позволяет различить возможные ходы, мы предпочитаем те, которые не выходят за границу части. Если различия между двумя ходами все еще нет, то связи разрываются случайным образом.

Вместо того чтобы продолжать до тех пор, пока все вершины не будут перемещены, можно остановить алгоритм раньше для экономии времени, например когда разрез графа текущего раздела отклоняется больше, чем определенный порог отсечения лучшего решения, найденного в этот момент. Правильный выбор этого порога может сократить время выполнения, не жертвуя при этом качеством решения.

Метод моделированного отжига (SA)

Второй метод решения задачи разбиения основан на моделированном отжиге (SA). Этот алгоритм оптимизации, впервые представленный в 1953 г., был доработан спустя тридцать лет Киркпатриком, который предположил, что этот метод может быть использован для поиска выполнимых решений в задачах оптимизации [11]. С тех пор метод стал очень популярным при решении многих комбинаторных задач оптимизации благодаря своей простоте, легкости в использовании, устойчивости к большому числу задач.

Для применения техники SA в контексте проблемы разбиения мы используем ее в качестве техники уточнения после упаковки контейнеров. Алгоритм SA переходит от одного решения к соседнему путем перемещения вершины из одной части в другую. Перемещение будет принято с некоторой вероятностью, которая зависит от таких параметров, как выигрыш при перемещении, а также температурный параметр, который постепенно уменьшается со временем. Для того чтобы найти оптимум, вершина перемещается с положительным выигры-

шем в ту часть, которая не имеет достаточной емкости с вероятностью, зависящей от количества свободного места. Если сделать это также зависимым от температуры, то это гарантирует, что к концу алгоритма он сойдется к правильному решению, не вызывая переполнения. Производительность SA сильно зависит от выбора различных параметров отжига: начальной температуры, графика охлаждения, длительности эпохи и условия остановки [11].

В свое время Киркпатрик предложил достаточно высокое значение начальной температуры, чтобы начальная вероятность принятия переходов была близка к 1. Однако слишком высокая начальная температура может привести к неоправданно большому времени вычислений. Это следует учитывать, выбирая начальную температуру таким образом, чтобы доля принятых переходов вверх по склону при начальной температуре была равна параметру начальной вероятностью принятия. Функция охлаждения будет постепенно снижать температуру, пока алгоритм не достигнет состояния остановки [12].

Условие остановки определяет, когда алгоритм достигает замороженного состояния и дальнейший поиск решения должен быть прекращен. Тривиальные условия остановки прекращают работу алгоритма, когда количество эпох достигает заданного максимума или когда температура падает ниже заранее выбранной конечной температуры. SA завершается, когда счетчик достигает заранее заданного предела [11].

Из-за случайного характера моделированного отжига разные прогоны могут привести к разным решениям. Качество решения можно улучшить, выполнив алгоритм SA несколько раз и взяв лучшее решение, но это требует больших затрат времени на вычисления.

Метод гибридного алгоритма (KLSA)

Третьим методом для анализа был выбран гибридный метод, совмещающий описанные ранее алгоритмы, так как каждый из них имеет преимущества и недостатки. Случайный фактор SA, как правило, исследует большее пространство решений, чем уточнение на основе KL, и, следовательно, приходит к лучшим решениям ценой, но это компенсируется большим временем вычислений. Чтобы объединить лучшее из обоих подходов, в данном разделе рассматривается гибридный подход [13].

Гибридный алгоритм очень похож на многоуровневый алгоритм, только на самом грубом уровне разбиение сначала уточняется с помощью нескольких прогонов SA. На самом грубом уровне с помощью SA можно найти лучшее решение, при этом дополнительные вычислительные затраты остаются относительно небольшими.

В дальнейших итерациях по расщеплению снова используется KL-уточнение, так как оно быстрее. Более того, из-за особенностей огрубления и разуплотнения ожидается, что глобально оптимальное решение будет находиться в окрестности самого грубого графа, и, таким образом, локальный оптимум, в котором KL застревает в конце, скорее всего, также является глобаль-

ным оптимумом. Опять же уточнение SA на самом грубом уровне может быть выполнено несколько раз, чтобы получить лучшее решение.

Сравнение

Для наиболее наглядного сравнения эффективности алгоритмов были изучены и проанализированы результаты тестирования алгоритмов, проведенные в исследовании Т. Верберга, Ф. де Турка и Б. Доета при разработке гибридного метода (KLSA) [13].

Для оценки алгоритмов были сгенерированы тестовые графы с различными размерами узлов. Эти узлы должны быть размещены на машинах со случайно сгенерированными значениями, которые представляют собой узлы сети. Количество узлов сети выбрано таким образом, чтобы их общая производительность составляла около 150% от общего веса узлов графа. Для каждого размера графа было сгенерировано 100 графов и весов машин для вычисления наилучшего развертывания с помощью различных алгоритмов, которые оцениваются по результирующему размеру разреза графа и времени обработки. Было произведено сравнение трех методов по качеству решения и времени выполнения, а также рассмотрено влияние порога отсечения для KL-уточнения и количества выполнений для SA [13].

Наибольшую перспективность показал гибридный алгоритм (KLSA). Многоуровневый алгоритм на основе KL представлен в качестве быстрого разделителя, который позволяет проводить расчеты развертывания в реальном времени, а имитированный отжиг улучшает качество решения для малых размеров графа ценой вычислительной мощности.

Выводы

На основе проделанного анализа можно сделать вывод, что наибольшей перспективой при разделении ресурсов обладают гибридные алгоритмы. Это утверждение доказывают результаты сравнения, представленные в данном обзоре, а также результаты сравнения GA-, SA-, PSO-, ACO-, FCM- и FCM-PSO-алгоритмов. Гибридные методы благодаря способности совмещать достоинства более простых методов позволяют добиться наилучших результатов в области распределения программных ресурсов в вычислительной сети.

В будущих работах я ставлю цель создать собственный гибридный алгоритм для распределения программных ресурсов или доработать уже имеющийся.

Библиографический список

1. Per-Olof Fjallstrom Algorithms for Graph Partitioning: A Survey. Sweden, 1998. 37 p.

2. Kernighan B., Lin S. An efficient heuristic procedure for partitioning graphs // Bell System Technical Journal. 1970. № 2. P. 291–307.

3. Петров А. Ю. Обзор существующих методов разделения программных и аппаратных ресурсов в вычислительных системах // Аэрокосмическое

приборостроение и эксплуатационные технологии: Четвертая Междунар. науч. конф. 2023. 8 p.

4. Saab Y. An effective multilevel algorithm for bisecting graphs and hypergraphs // Transactions on Computers. 2004. № 6. P. 641–652.

5. Sun L., Leng M., Yu S. A New Multi-level Algorithm Based on Particle Swarm Optimization for Bisecting Graph // Lecture Notes in Computer Science. 2007.

6. Pellegrini F. Scotch and libScotch 5.1 User's Guide. 2008. 128 p.

7. Karypis G., Kumar V. A fast and high quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs // SIAM Journal on Scientific Computing. 1999. № 1. P. 359–392.

8. Meyerhenke H., Monien B., Schamberger S. Graph partitioning and disturbed diffusion // Parallel Computing. 2009. № 35. P. 544–569.

9. Khandekar R., Rao S., Vazirani U. Graph partitioning using single commodity flows // Journal of the ACM. 2009. 15 p.

10. Hendrickson B., Leland R. A multilevel algorithm for partitioning graphs // ACM/IEEE conference on Supercomputing (CDROM). 1995. 15 p.

11. Kirkpatrick S., Gelatt C. D., Vecchi M. P. Optimization by simulated annealing. 1983. P. 671–680.

12. Jing Y., Kuang J., Du J., Hu B. Application of improved simulated annealing optimization algorithms in hardware/software partitioning of the reconfigurable system-on-chip // Communications in Computer and Information Science. 2014. № 405. C. 532–540.

13. Verbelen T., De Turck, Dhoedt B. Graph partitioning algorithms for optimizing software deployment in mobile cloud computing // Future Generation Computer Systems. 2013. № 2. 26 p.

УДК 004.32

Е. А. Симахина*
кандидат технических наук
П. М. Еремеев*
первый заместитель главного конструктора
К. С. Балиж*
кандидат технических наук
*Научно-исследовательский институт «Субмикрон»

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К УНИФИКАЦИИ ИНТЕРФЕЙСОВ В КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Предложен подход к построению бортовых вычислительных комплексов космических аппаратов на основе интеграции систем жесткого реального времени с высокоскоростными интерфейсами обмена информацией на верхнем уровне иерархии GigaSpaceWire-SpaceFibre и бортовых устройств с интерфейсами нижнего уровня иерархии SpaceWire и Serial Rapid IO в единую сеть.
Ключевые слова: цифровые интерфейсы, бортовые системы управления, высокоскоростной информационный обмен, сетевая интеграция, унификация каналов межприборного взаимодействия.

E. A. Simakhina*
PhD, Tech.
P. M. Eremeev*
First Deputy Chief Designer
K. S. Balizh*
PhD, Tech.
*Submicron Research Institute

A MODERN APPROACH TO THE UNIFICATION OF INTERFACES IN THE SPACE INDUSTRY

An approach to the construction of spacecraft's on-board computing complexes based on the integration of hard real-time systems with high-speed informational exchange interfaces at the upper level of hierarchy – GigaSpaceWire-SpaceFibre and on-board devices with interfaces of the lower level of hierarchy – SpaceWire and Serial Rapid IO into a single network is proposed.
Keywords: digital interfaces, on-board control systems, high-speed informational exchange, network integration, unification of channels of inter-assembly interaction.

Современные бортовые системы управления аэрокосмической техники основаны на архитектуре единого вычислительного ядра, соединенного с исполнительными узлами и блоками. Такая архитектура зарекомендовала себя как высоконадежная за счет резервирования и при необходимости возможности быстрой замены периферийных узлов, блоков и модулей. Однако со вступлением в эру цифровизации разработчики все чаще сталкиваются с технологическим ограничением увеличения скоростей обмена потоковыми данными, связанным с необходимостью поочередной обработки данных единым вычислительным

центром системы, а также разнородным набором интерфейсов, что влечет за собой расширение номенклатуры применяемых узлов и переходников для обеспечения обмена данными.

Унификация конструктивных единиц космической техники является стратегической тенденцией отечественного космического приборостроения, поскольку массовое производство типовых единиц всегда более рационально с точки зрения затрат на их разработку и производство. Использование большого числа разнотипных вариантов построения интерфейсов в космической технике не является оптимальным решением разработчиков, поскольку не позволяет достичь лучших массогабаритных характеристик современной аппаратуры ответственного назначения, служит источником проблем с электромагнитной совместимостью и сложностью монтажа. Поэтому разработка унифицированных интерфейсов передачи информации [1], соответствующих внешним воздействующим факторам (ВВФ), конструктивным и архитектурным решениям является актуальной задачей. В некоторых задельных НИОКР выполняемых АО «НИИ „Субмикрон„», основными интерфейсами управления бортовых систем являются интерфейсы SpaceWire (ECSS-E-ST-50-12C) со скоростью до 100 Мбит/с, МКИО ГОСТ Р 52070–2003 (скорость до 1 Мбит/с) и RS485 ГОСТ Р ИСО 8482-93 (скорость до 10 Мбит/с), SerialRapidIO (RapidIO Spec. 2.3) со скоростью выше 100 Мбит/с. Архитектура построения приборов предполагает их стандартизированный транспортный протокол информационного обмена.

Наряду с увеличением сложности архитектурных и конструктивных решений, применяемых в современных космических аппаратах (КА), ужесточаются и требования к характеристикам интерфейсов передачи данных. При этом применение единого универсального интерфейса в бортовом оборудовании невозможно, поскольку узлы, блоки и периферийные устройства имеют различное функциональное назначение, конструкцию и технические особенности. Кроме того, различные интерфейсы адаптированы под выполнение задач различных уровней иерархии системы. Этому направлению уделяется пристальное внимание и постепенно внедряются интерфейсы, унифицированные по какому-то одному или нескольким параметрам.

На основе анализа характеристик и возможностей современных интерфейсов космического применения предлагается к реализации ограниченная группа интерфейсов с наилучшими техническими показателями:

– для верхнего уровня иерархии – связь между блоками по высокоскоростным помехозащищенным каналам связи с помощью оптических интерфейсов SpaceFibre/GigaSpaceWire;

– для нижнего уровня иерархии – связь между модулями и исполнительными устройствами внутри блоков по интерфейсам SpaceWire либо Serial Rapid IO.

Ключевая особенность предлагаемого решения – универсальный общий протокол верхнего уровня интерфейсов группы SpaceWire и SpaceFibre/GigaSpaceWire, что обеспечивает надежную передачу информации.

Главным преимуществом использования SpaceFibre на верхнем архитектурном уровне бортовых вычислительных комплексов является наличие механизмов обеспечения качества сервиса [2], что гарантирует надежность передачи информации при возникновении неисправностей сетевых компонентов. Затраты на реализацию при этом повышаются в сравнении с реализацией качества сервиса в SpaceWire/GigaSpaceWire, и увеличивается время ожидания доставки пакетов. Однако при построении больших, разветвленных вычислительных сетей эти издержки компенсируются возможностью минимизации ошибок и конфликтов в сети передачи данных за счет четких правил контроля качества сервиса передачи пакетов и распределений по магистральной сети.

Что касается распространенности и практической доступности предлагаемых к использованию интерфейсов, то технологии построения новых унифицированных интерфейсов **SpaceWire**/SpaceFibre/GigaSpaceWire поддерживаются ведущими космическим агентствами мира – **Роскосмос**, **ESA**, **NASA**, **JAXA**, реализуются и применяются в перспективных проектах космической техники ведущим корпорациями космической отрасли. Реализация интерфейса SerialRapid IO в отечественной электронной компонентной базе (ЭКБ) также хорошо освоена и широко распространена, что важно с точки зрения преемственности использования технологий отечественного производства и экономической эффективности.

Активное использование высокоскоростных интерфейсов в российской космической технике стратегически важно, поскольку система обработки данных бортовых комплексов управления (БКУ) КА относится к классу систем жесткого реального времени (СЖРВ), для которых требуемое значение времени обработки прерываний и коммутации задач составляет единицы–десятки микросекунд. Общим требованием СЖРВ является недопустимость потерь заявок на решение задач и получение результатов решений в строго регламентированные отрезки реального времени, определяемые логикой и динамикой процессов управления объектом. В качестве нового подхода к формированию и комплексированию бортовых систем предлагается рассмотреть концепцию, включающую как интеграцию объектов реального времени и бортовых устройств в единую сеть, так и конструктивную интеграцию на основе «систем на кристалле» и «систем в корпусе». Реализация высокоскоростных интерфейсов связи на верхнем уровне иерархии позволит обеспечить современные технические характеристики перспективных КА и их группировок.

Увеличение объема решаемых функциональных задач на борту космического аппарата (КА) влечет за собой аппаратно-программное усложнение космической техники. Сетевая интеграция бортовых устройств наиболее эффективно может осуществляться на основе стандарта ГОСТ Р 70020–2022 «Интерфейсы и протоколы высокоскоростного межприборного информационного обмена и комплексирования бортовых систем космических аппаратов SpaceWire-RUS», вступившего в силу на территории РФ с 01.06.2022 г. Применение перспективных интерфейсов SpaceWire-GigaSpaceWire-SpaceFibre с единым протоколом обмена верхнего уровня гарантирует сквозную трансляцию данных от

пользователя к конечному устройству полезной нагрузки КА и в обратном направлении. При необходимости на нижнем уровне может дополнительно использоваться интерфейс SerialRapidIO. В таком случае практической необходимостью обоснована разработка устройств сопряжения, включающих порты как Serial Rapid IO, так и SpaceWire-GigaSpaceWire-SpaceFibre.

Таким образом, подход к унификации бортовых интерфейсов космического назначения, основанный на внедрении двух групп интерфейсов (в зависимости от уровня иерархии связи) с наиболее подходящими техническими характеристиками представляется перспективным и многообещающим решением ряда задач современного космического приборостроения.

Библиографический список

1. Раткин Л. Электроника космических корпораций будущего в «Индустрии 4.0» // Электроника. 2017. № 7 (00168).

2. Матвеева Н. А., Суворова Е. А., Шейнин Ю. Е. Анализ качества сервиса, предоставляемого современными стандартами бортовой передачи данных // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16, № 6 (2). С. 505–512.

УДК 004.7; 004.9

Е. А. Суворова
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ АВТОМАТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЗАИМОЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ПОТОКАМИ ДАННЫХ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ ЧЕРЕЗ ОБЩИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

Как правило, СнК включает один или несколько контроллеров внешних интерфейсов, по которым осуществляется обмен данными с внешним миром. Для потоков данных требуется поддерживать различные механизмы/параметры качества сервиса (QoS). Для передачи этих потоков данных в разных частях СнК могут использоваться как отдельные, так и общие (разделяемые между всеми потоками данных) ресурсы. Применение общих ресурсов вызвано ограничениями по аппаратным затратам. Часть правил доступа к общим ресурсам определяется используемыми стандартами передачи данных (стандартами для внешних интерфейсов и для внутрикристальных интерфейсов). Другие правила (например, связанные с уровнями приоритетов потоков, их количеством) определяются в соответствии с задачами, для которых разрабатывается система. Использование общих ресурсов может приводить к возникновению взаимозависимостей между потоками данных. Передача одних потоков данных может довольно существенно влиять на временные характеристики других потоков данных. Использование разных стандартов и, соответственно, разных правил обработки данных также может приводить к тому, что требуемые характеристики QoS становится трудно обеспечивать и контролировать, будут ли они обеспечены. В крайних проявлениях эти факторы могут приводить к возникновению взаимоблокировок потоков данных. Предлагается использование временных автоматов для оценки достижимых временных характеристик потоков данных и выявления возможностей блокировок потоков данных. Временные автоматы хорошо подходят для решения таких задач, поскольку могут сочетать свойства темпоральных логик и сетевых калькуляторов. Приведены примеры использования их в обоих качествах.
Ключевые слова: качество сервиса передачи данных, временные автоматы, блокировки потоков данных, разделение физических ресурсов между потоками данных.

E. A. Suvorova
PhD, Tech., Associate Professor
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

USE OF TIME AUTOMATA TO EVALUATE INTERDEPENDENCIES BETWEEN DATA FLOWS TRANSMITTED THROUGH SHARED PHYSICAL RESOURCES OF SYSTEM-ON-CHIP

As a rule, SoC include one or more controllers of external interfaces which used to data exchange with the outside world. It is required to support various Quality of Service (QoS) mechanisms/parameters for data flows. Both separate and common (shared between all data flows) resources can be used to transfer these data flows in different parts of the SoC. The use of shared resources is driven by hardware cost limitations. Part of the rules for accessing shared resources is determined by the data transfer standards used (standards used for external interfaces and for on-chip interfaces). Other rules (for example, rules related to the priority levels of flows, their number) are

determined in accordance with the tasks for which the system is being developed. The use of shared resources can lead to interdependencies between data flows. The transmission of some data flows can quite significantly affect the timing of other data flows. The use of different standards, and, accordingly, different data processing rules, can also lead to the fact that the required QoS characteristics become difficult to provide, it is difficult to control whether they will be provided. In extreme cases, these factors can lead to data flow deadlocks. This paper proposes the use of time automata to assess the achievable temporal characteristics of data flows and identify the possibilities of deadlocks data flows. Temporal automata are well suited for solving such problems, since they can combine the properties of temporal logics and network calculators. The paper provides examples of their use in both of these qualities.
Keywords: quality of data transmission service, time automata, blocking of data flows, division of physical resources between data flows.

Введение

Современные СнК, как правило, включают один или несколько контроллеров внешних интерфейсов для взаимодействия с внешним миром – для подключения к локальной сети, для подключения внешней памяти и др. Для передаваемых и принимаемых по этим интерфейсам потоков данных должны обеспечиваться различные параметры качества сервиса. Внутри СнК эти потоки данных передаются через внутреннюю коммуникационную систему.

Соответственно выполняются преобразования потоков данных передаваемых по внешним интерфейсам и потоков данных передаваемых по внутренней коммуникационной системе. Форматы передаваемых данных могут существенно различаться. Также могут различаться правила доступа к внутренней коммуникационной системе и внешней коммуникационной системе. Часть из них может определяться используемыми стандартами передачи данных, другая часть – в соответствии с решаемыми задачами. Свои особенности могут привнести и конкретные реализации этих правил, например временные задержки на арбитраж.

Часть физических ресурсов системы выделяется индивидуально каждому потоку, другие ресурсы используются несколькими (всеми) потоками данных по очереди (в режиме разделения времени). Из-за ограничений на допустимые аппаратные затраты, из-за необходимости исключать простои (нерациональное использование физических ресурсов) избежать совместного использования физических ресурсов несколькими потоками данных становится невозможно. Однако совместное использование ресурсов может приводить к невозможности обеспечить требуемые параметры QoS и даже взаимоблокировки потоков. На этапе проектирования системы из-за разнородности правил передачи данных, используемых в разных стандартах, это очень трудно контролировать. Еще одним фактором, усложняющим процесс проектирования, являются особенности реализации алгоритмов в моделях уровня регистровых передач (RTL-моделях). На этом уровне определяются такие детали реализации, как количество тактов, в течение которого выполняется то или иное действие, какие действия будут выполняться параллельно (в одном такте). Соответственно определяется, какие события могут или не могут произойти одновременно (в одном такте). Это так-

же оказывает существенное влияние на временные характеристики и на возможность блокировки потоков данных.

В следующих разделах показано, как использование временных автоматов позволяет учесть эти факторы при проектировании СнК.

Временные автоматы

Временные автоматы (timed automata) были разработаны на основе автоматов с конечным числом состояний (конечных автоматов). Исходно они были предназначены для исследования поведения систем в реальном времени, для оценки достижимости состояния систем и времени выполнения различных действий – времени выполнения некоторой трассы, представляющей собой последовательность локаций (location). В плане оценки достижимости/недостижимости состояний систем временные автоматы сравнимы с темпоральными логиками. Однако форма представления временных автоматов позволяет более удобным для разработчика образом сопоставлять (соотносить) их с RTL-моделями. Это позволяет минимизировать расхождения между математической моделью и проектируемой RTL-моделью в системе, переносить изменения, выполняемые в одной из моделей во вторую [1–4].

Временные автоматы позволяют оценивать временные характеристики систем за счет того, что в них определено понятие специальных переменных – часов/таймеров (clock). Данные переменные, в частности, могут использоваться для того, чтобы определять время перехода временного автомата из одной локации в другую по одному (по каждому возможному) пути между этими локациями. Поэтому можно использовать временные автоматы как основу для (сетевых) калькуляторов, позволяющих рассчитать временные характеристики системы. За счет того, что рассматриваются различные (все возможные) трассы, временные автоматы могут использоваться для вычисления граничных времен – минимального и максимального. Во временных автоматах могут использоваться также и переменные других типов. Например, это могут быть счетчики различных событий. Это позволяет использовать временные автоматы и для оценки среднего времени [3–7].

СнК или некоторая ее подсистема может быть представлена совокупностью временных автоматов, которые взаимодействуют между собой через каналы и через общие переменные. Временные автоматы могут объединяться в иерархические структуры. Совокупность временных автоматов после выполнения исследований может представляться обобщенным временным автоматом, генерирующим входные данные / принимающим данные от следующей группы автоматов, для которых планируется выполнить дальнейшее исследование [3; 4; 6; 7].

Для временных автоматов, так же как и для темпоральных логик, одной из основных проблем является вычислительная сложность [5]. Может существовать слишком большое количество трасс между локациями, и/или эти трассы могут быть очень длинными. Это может не позволить за обозримое время вычислений оценить/доказать достижимость/недостижимость определенной

локации. Однако для рассматриваемых примеров эта проблема, с одной стороны, снимается за счет того, что параметры QoS должны обеспечиваться на каждом интервале времени, имеющем очень небольшую продолжительность по сравнению с временем жизни системы, что позволяет существенно ограничить длину и количество трасс. С другой стороны, возможность использования обобщенных временных автоматов также позволяет несколько снизить вычислительную сложность.

Пример использования временных автоматов для оценки временных характеристик и проверки отсутствия блокировок

В качестве примера мы выбрали типовой фрагмент СнК, включающий контроллер вешнего интерфейса (в данном случае SpaceFibre [8]), который подключается к внутренней коммуникационной системе СнК (в данном случае реализованной на базе стандарта AXI). Структурная схема данного компонента представлена на рис. 1, *а*.

На этой схеме потоки пакетов данных, читаемые из памяти, по различным виртуальным каналам передаются в один физический канал. Все потоки данных используют общие ресурсы: канал чтения данных (AXI_master), буфер запросов и буфер прочитанных данных, физический канал, по которому передаются данные в сеть. В такой схеме потенциально возможны взаимозависимости между потоками данных и блокировки одних потоков данных из-за других.

Арбитр обращений к физическому каналу функционирует в соответствии с набором правил, определенных в используемом стандарте передачи данных, например в стандарте SpaceFibre. Потенциально в него могут быть добавлены и дополнительные правила, не противоречащие используемому стандарту. Логика функционирования (правила функционирования) контроллера доступа к памяти определяются в соответствии с техническим заданием на разрабатываемую систему. Возможна ситуация, при которой правила функционирования контроллера доступа к памяти и правила функционирования арбитра обращений к физическому каналу определены таким образом, что они приведут к блокировкам потоков данных. Исходно для арбитра обращений AXI правила были определены таким же образом, как в SpaceFibre для арбитра обращений к физическому каналу.

На рис. 1, *б* представлена структура модели на основе временных автоматов, соответствующих рассматриваемому контроллеру, а также позволяющих учесть поведение остальных частей системы, расположенных со стороны интерфейса AXI и внешних для интерфейса SpaceFibre. На рис. 2 показаны временные автоматы, соответствующие входам и выходам буфера виртуального канала.

С использованием этих временных автоматов было определено, что выбранная стратегия арбитража транзакций от виртуальных каналов в сторону AXI приводит к увеличению времени формирования фреймов данных во всех каналах для передачи в сеть в N раз по сравнению с вариантом, при котором

функционирует только один виртуальный канал. Данная ситуация возникает вследствие того, что размер транзакции на AXI существенно меньше максимального размера поля данных фрейма SpaceFibre.

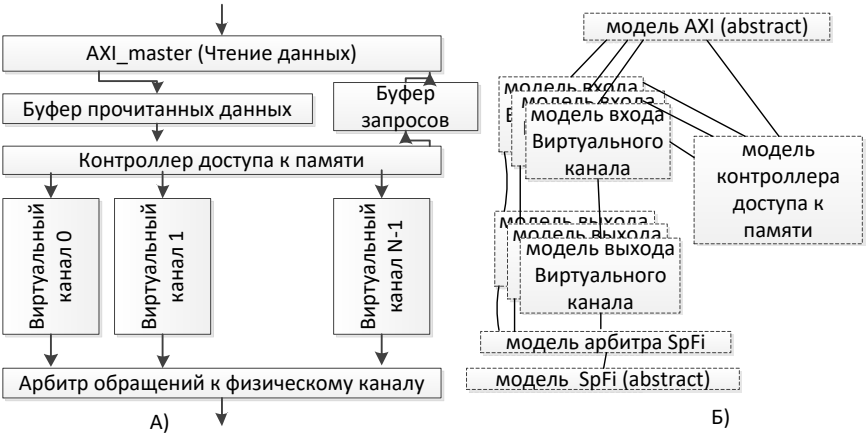


Рис. 1. Обобщенная структура контроллера SpaceFibre

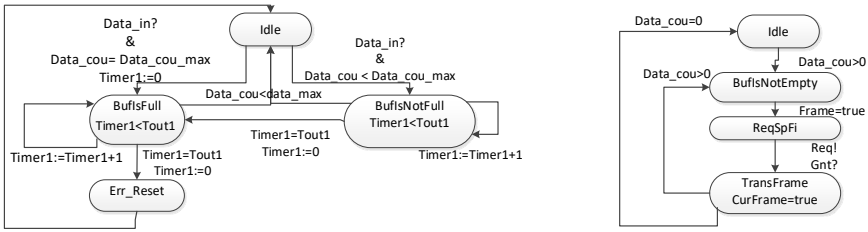


Рис. 2. Временные автоматы входа и выхода виртуального канала

В качестве одного из возможных решений проблемы может быть рассмотрено увеличение размера транзакций на AXI до размера фрейма SpaceFibre. Однако моделирование временных автоматов, в которые внесено данное изменение, показывает, что из-за особенностей кредитования SpaceFibre оно может привести к блокировке возможности передачи всех потоков данных. Для того чтобы исключить эту блокировку, должна быть сделана еще одна модификация: используемый размер транзакции на AXI должен выбираться в соответствии с текущим количеством свободного места в буфере соответствующего виртуального канала. После модификаций исключена возможность блокировок и время формирования фреймов такое же, как если бы виртуальные каналы использовали физически отдельные ресурсы доступа к AXI.

Заключение

Показаны возможности временных автоматов для оценки взаимовлияния потоков данных, использующих физически общие ресурсы СнК. Рассмотренный пример показывает, что временные автоматы могут быть использованы и для проверки достижимости/недостижимости состояний, и для оценки временных характеристик передачи потоков данных.

Библиографический список

1. Alur R., La Torre S., Pappas G. Optimal paths in weighted timed automata // Lecture Notes in Computer Science, 2034. 2001. P. 49–62.

2. Modelling and analysis of security protocols / P. Ryan, S. Schneider, M. Goldsmith [et al.]/ Addison Wesley, 2001.

3. Mobile data offloading: how much can wifi deliver? / K. Lee, J. Lee, Y. Yi [et al.] // Proceedings of the 6th International COnference. ACM, 2010.

4. Bouloukakis G., Kattepur A., Georgantas N., Issarny V. Queueing network modeling patterns for reliable and unreliable publish/subscribe protocols // 15th EAI International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services (MobiQuitous). N. Y.: ACM, 2018.

5. Andr´e E., Lime D., Ramparison M. TCTL model checking lower/upper-bound parametric timed automata without invariants // Formats / ed. by D. N. Jansen and P. Prabhakar. Vol. 11022. Lecture Notes in Computer Science. Beijing, China: Springer, 2018. P. 1–17.

6. Beneš N., Bezděk P., Larsen K. G., Srba J. Language Emptiness of Continuous-Time Parametric Timed Automata // ICALP. Part II. Vol. 9135. Lecture Notes in Computer Science. Kyoto, Japan: Springer, 2015. P. 69–81.

7. André E. What’s decidable about parametric timed automata? // International Journal on Software Tools for Technology Transfer 21.2. 2019. Apr. P. 203–219.

8. SpaceFibre – Very high-speed serial link. ECSS-E-ST-50-11C // ESA-ESTEC. Noordwijk, The Netherlands. 2019. 233 p.

УДК 621.396.69

С. И. Шершнёв*
аспирант
М. А. Ваганов*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

РАЗРАБОТКА НАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВКИ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ

Рассмотрены результаты схемотехнического моделирования направленного ответвителя с изменяемыми параметрами за счет применения перестраиваемых конденсаторов между линиями связи, выполненных по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). Приводятся результаты сравнения параметров ответвителя при различных значениях емкости МЭМС конденсаторов. Рассчитаны диапазон перестройки прямых вносимых потерь, а также зависимость изменения ответвления от емкости МЭМС конденсаторов. Обозначена область применения рассмотренного направленного ответвителя.
Ключевые слова: микрополосковый направленный ответвитель, ответвление, ответвитель, прямые вносимые потери, микрополосковая линия, МЭМС конденсатор.

S. I. Shershnev*
PhD Student
M. A. Vaganov*
PhD, Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DEVELOPMENT OF A DIRECTIONAL COUPLER WITH VARIABLE PARAMETERS FOR GAIN CONTROL SYSTEMS

The results of circuit simulation of a directional coupler with variable parameters due to the use of tunable capacitors between communication lines, made using the technology of microelectromechanical systems (MEMS), are considered. The results of a comparison of the coupler parameters for different capacitance values of MEMS capacitors are presented. The tuning range of the direct insertion loss is calculated, as well as the dependence of the direction change on the capacitance of MEMS capacitors. The scope of the considered directional directional coupler is indicated.
Keywords: microstrip directional coupler, coupling, coupler, direct insertion loss, microstrip line, MEMS capacitor.

Введение

В современном мире количество различных СВЧ-устройств значительно возросло. Модули приемников, а также мощных передатчиков СВЧ-диапазона используются в радиолокации, телекоммуникации и навигации. Для установки необходимого уровня СВЧ-мощности и автоматической стабилизации на заданном уровне используется система автоматической регулировки усиления. В представленной статье рассматривается направленный ответвитель с изменяе-

мыми параметрами, который может быть использован как часть системы регулировки коэффициента усиления.

Схемотехническое моделирование направленного ответвителя

Для реализации ответвителя с изменяемыми параметрами будет использован ответвитель на связанных микрополосковых линиях. В простейшем случае направленный ответвитель на связанных линиях представляет собой восьмиполюсник, состоящий из двух параллельных микрополосковых линий, электрическая длина которых равна четверти длины волны [1; 2]. Для разработки направленного ответвителя необходимо выполнить расчет его размеров для СВЧ-сигнала конкретной частоты. В данном случае направленный ответвитель будет рассчитан на центральную частоту 3,5 ГГц. В качестве диэлектрического основания предполагается использовать углеводородный полимерный материал с керамикой и тканым стекловолокном WL-CT338 от компании Taizhou WangLing (China). Диэлектрическая проницаемость материала составляет 3,38 при тангенсе угла диэлектрических потерь 0,0029. Толщина диаэлектрического основания составляет 0,508 мм.

На рис. 1 показана принципиальная электрическая схема микрополоскового направленного ответвителя. Для создания схемы и топологии ответвителя была использована система автоматизированного проектирования и моделирования высокочастотных систем и устройств AWR Design Environment.

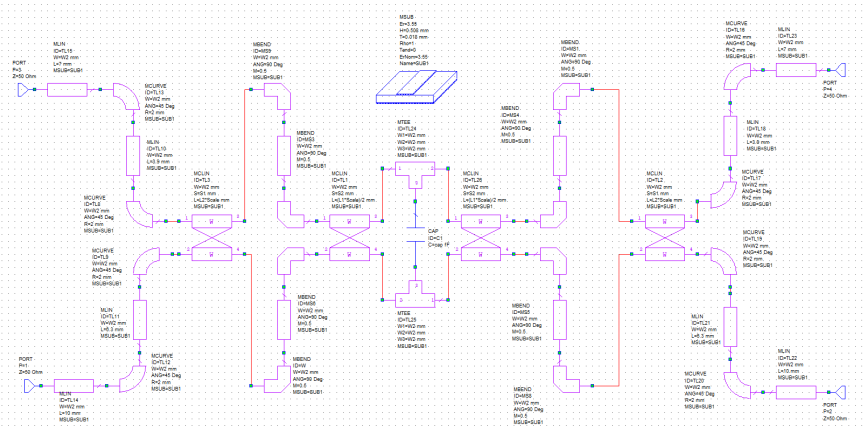


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема микрополоскового направленного ответвителя

На рис. 2 изображена разработанная топология микрополоскового направленного ответвителя. Для реализации возможности изменения параметров ответвителя, таких как прямые вносимые потери, в классический направленный ответвитель между линиями связи добавлены МЭМС перестраиваемые конденсаторы [3].

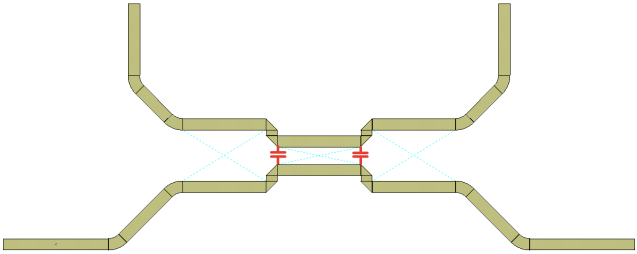


Рис. 2. Топология микрополоскового направленного ответвителя

На рис. 3 показан результат схемотехнического моделирования прямых вносимых потерь ответвителя при различных значениях емкости перестраиваемых МЭМС конденсаторов.

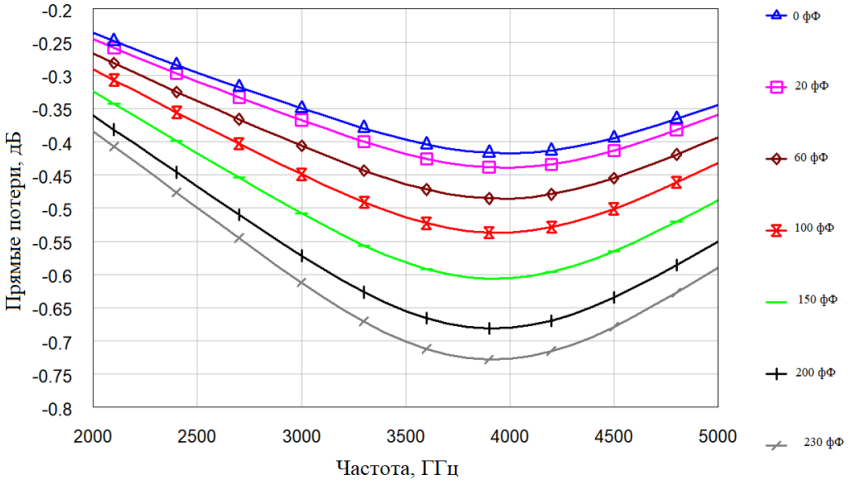


Рис. 3. Параметры ответвителя при различных значениях емкости МЭМС конденсаторов

Из рис. 3, 4 видно, что при изменении емкости МЭМС конденсаторов в диапазоне 20–230 фФ происходит близкое к линейному изменение прямых вносимых потерь, что дает возможность точной подстройки коэффициента передачи мощных GaN транзисторных усилителей, выполненных по схеме суммирования с последовательными или параллельными сумматорами. Диапазон перестройки прямых вносимых потерь составляет 0,3 дБ, что при сложении двух GaN транзисторных усилителей с выходной мощностью 150 Вт позволяет перестраивать выходную мощности в диапазоне 10%.

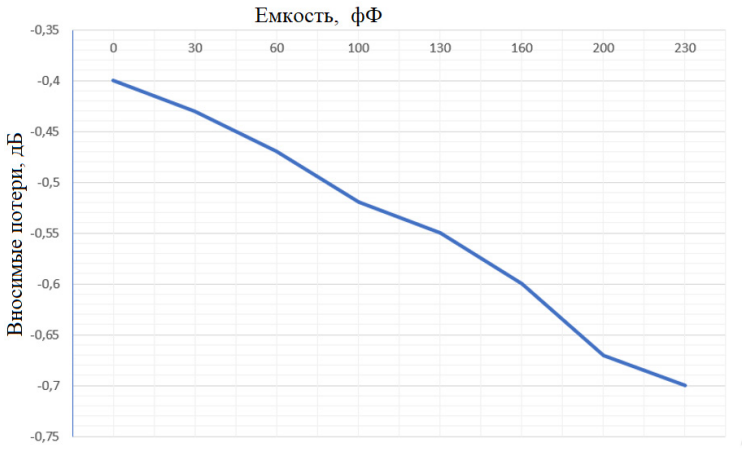


Рис. 4. Зависимость емкости перестраиваемого конденсатора от вносимого затухания на частоте 3,5 ГГц

Также при изменении емкости МЭМС конденсаторов происходит одновременное изменение коэффициента ответвления. Рассмотрим на рис. 5 процесс изменения коэффициента ответвления при изменении емкости перестраиваемых МЭМС конденсаторов.

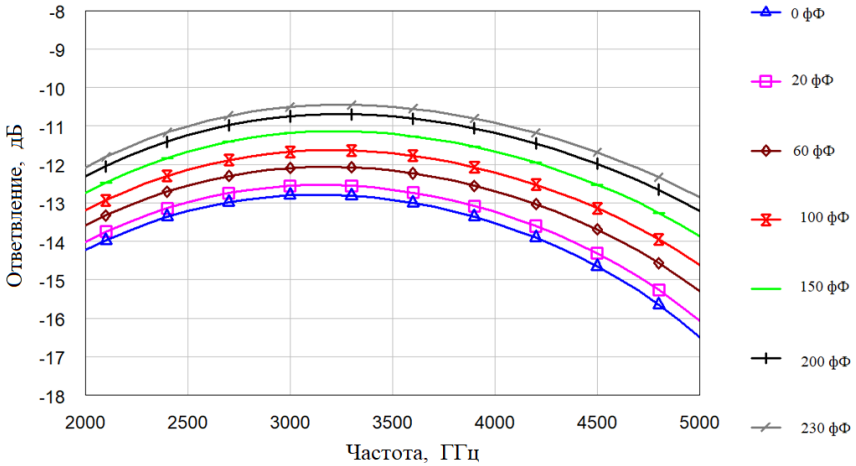


Рис. 5. Зависимость изменения ответвления от емкости МЭМС конденсаторов

На рис. 6 показана зависимость ответвления от емкости перестраиваемого конденсатора от на частоте 3,5 ГГц.

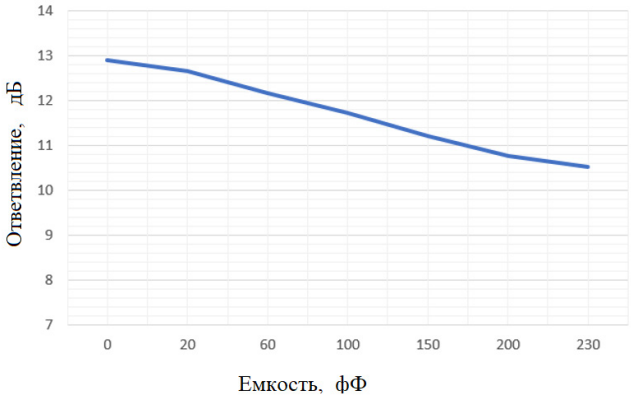


Рис. 6. Зависимость ответвления от емкости перестраиваемого конденсатора на частоте 3,5 ГГц

Диапазон изменения ответвления составляет 2,5 дБ, это необходимо учесть при калибровке системы регулировки усиления, а именно при разработке схемы управления МЭМС конденсаторами.

Заключение

Рассмотрен направленный ответвитель на связанных микрополосковых линиях. С помощью электромагнитного моделирования исследованы основные характеристики ответвителя. В результате расчетов был определен диапазон перестройки прямых вносимых потерь ответвителя, который составляет 0,3 дБ, что при суммировании GaN транзисторных усилителей с выходной мощностью 150 Вт позволяет перестраивать мощность в диапазоне 10%.

Представленная конфигурация ответвителя с изменяемыми параметрами может использоваться как дополнительная прецизионная система подстройки выходной мощности в GaN транзисторных усилителях, выполненных по схемам суммирования с последовательными или параллельными сумматорами.

Библиографический список

1. Agharasuli A. UWB stripline coupler with low loss and ripple // 2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). 2019. P. 828–830.

2. Zhang Z. A Novel Structure o High Directivity Broadband Microstrip Coupler // International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications. 2015. P. 1–4.

3. Nghe C. T., Rautschke F., Boeck G. Performance Optimization of Capacitively Compensated Directional Couplers // Proceedings of the 47th European Microwave Conference. 2017. P. 408–411.

СОДЕРЖАНИЕ

АКУСТООПТИКА И АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА

Багдасарян А. С., Гуляев Ю. В., Доберштейн С. А., Синицына Т. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЕРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ С МАЛЫМИ ПОТЕРЯМИ И ВЫСОКОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОСТЬЮ АЧХ 4

Балакший В. И., Манцевич С. Н., Купрейчик М. И. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КОЛЛИНЕАРНОМ АКУСТООПТИЧЕСКОМ ГЕНЕРАТОРЕ С ОПТИЧЕСКИМ ГЕТЕРОДИНИРОВАНИЕМ 17

Балышева О. Л. ПАВ И ОАВ: ИНТЕГРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ 22

Белый В. Н., Хило П. А., Хило Н. А., Ропот П. И., Кулаков С. В. АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЕССЕЛЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В КРИСТАЛЛЕ LIBI(MOO4)2 27

Белый В. Н., Хило Н. А., Шакин О. В., Хило П. А. БЕССЕЛЕВЫ АКУСТИЧЕСКИЕ ПУЧКИ В ПОПЕРЕЧНО АНИЗОТРОПНЫХ ТЕТРАГОНАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛАХ 33

Быков А. А., Хохлов Д. Д., Марченков А. Ю., Элиович Я. А., Аккуратов В. И., Писаревский Ю. В. ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В ТЕО2 ПОД ДАВЛЕНИЕМ 38

Доберштейн С. А., Веремеев И. В., Разгоняев В. К. АСИНХРОННЫЕ ВЫСОКОДОБРОТНЫЕ STW-РЕЗОНАТОРЫ С СЕКЦИОНИРОВАННЫМИ ОТРАЖАТЕЛЬНЫМИ РЕШЕТКАМИ И ПОСТЕПЕННЫМ УВЕЛИЧЕНИЕМ ПЕРИОДА ЭЛЕКТРОДОВ 45

Костылева Е. И., Манцевич С. Н. КВАЗИКОЛЛИНЕАРНАЯ ГЕОМЕТРИЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КРИСТАЛЛАХ ГАЛОГЕНИДОВ РТУТИ 52

Купрейчик М. И., Балакший В. И., Манцевич С. Н. СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ДВУОСНОГО КРИСТАЛЛА ЙОДИДА ИНДИЯ 57

Манцевич С. Н., Слиньков Г. Д. ВЛИЯНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА СПЕКТРАЛЬНОЕ ПРОПУСКАНИЕ КОЛЛИНЕАРНЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК 62

Никитин П. А. О ВЛИЯНИИ ШИРИНЫ ЗАЗОРА МЕЖДУ СЕКЦИЯМИ ЭЛЕКТРОДА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ДЕФЛЕКТОРА НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИ ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ 67

Поликарпова Н. В., Дьяконов Е. А., Чиж И. К. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В РАЗЛИЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ В КРИСТАЛЛЕ ПАРАТЕЛЛУРИТА 73

Поликарпова Н. В., Марунин М. В. НЕВЗАИМНОЕ ОТРАЖЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН ОТ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ В КРИСТАЛЛЕ ПАРАТЕЛЛУРИТА 78

Сарпова А. С., Веремеев И. В. ТЕХНОЛОГИИ КОРПУСИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ ПАВ- И ОАВ-УСТРОЙСТВ НА УРОВНЕ ПОДЛОЖКИ 82

Хасанов И. Ш., Чуриков Д. В., Вольпян О. Д., Алыбин К. В., Дронский Р. В. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ТОНКИХ ГРАДИЕНТНЫХ ПЛЕНОК АППРОКСИМАЦИЕЙ В ВИДЕ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОСКОПИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА НА ОСНОВЕ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ФИЛЬТРА 87

Хоркин В. С., Манцевич С. Н., Кузнецов М. С., Зараменских К. С., Субботин К. А. АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КУБИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛА KRS-5 95

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Вознесенский Е. А. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА 102

Добровольская А. А., Майоров Н. Н., Язвенко М. Р. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ РАЗВИТИЯ МОРСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ПОРТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗНЫХ ПРИОРИТЕТОВ ЗАЯВОК СУДОВ 107

Изотов О. А. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВНЕДРЕНИЯ НОВЫХ СРЕДСТВ УКРУПНЕНИЯ СБОРНЫХ ГРУЗОВ В КОНТЕЙНЕРНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ 113

Костин А. С., Силин Ю. А. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА БЕСПИЛОТНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА 118

Рассыхаева М. Д., Казадио Д. Ф. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ 123

Соловьева Е. Е., Маликова Т. Е. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ДЕЙСТВИЯМИ ПОГРУЗЧИКА ПРИ ВЫБОРКЕ КОНТЕЙНЕРОВ ИЗ ОПЕРАЦИОННОГО ШТАБЕЛЯ МОРСКОГО ТЕРМИНАЛА 127

Федоринов А. Ю., Карпенко В. В., Бурлуцкий С. Г. ПРОВЕДЕНИЕ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСОВ С БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ 133

Чабаненко А. В., Казадио Д. Ф. ЦИФРОВОЙ КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ..... 138

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИТУАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ В ЭЛЕКТРОНИКЕ И ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Винниченко А. В., Алексеев В. М. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТИПОВОГО АЛГОРИТМА ВНЕДРЕНИЯ ERP-СИСТЕМ..... 144

Винниченко А. В., Истомина Ю. П. АЛЬФА КРОНБАХА ДЛЯ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 151

Герасимов О. М., Домкин К. И., Коршунов Г. И., Северинец Г. А. ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА И УСТРАНЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ НЕДОСТАТКОВ..... 156

Климочкина Л. А., Чабаненко А. В. ВНЕДРЕНИЕ TQM В ТЕХНОСФЕРНУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ..... 163

Мишура Т. П. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО НАСОСА ГЦНА-1753 168

Мишура Т. П., Епифанцев К. В. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРИБОРОВ И СТАНДАРТОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ..... 174

Рассыхаева М. Д. ИНТЕГРИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДЕЛОВОГО СОВЕРШЕНСТВА В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ..... 179

Решетникова Н. В., Панкратов А. Г., Швецов Д. С., Шишков И. А. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПЛ-072 УЗ 183

Тимофеев К. Н. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОЕКТОВ НА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА..... 193

Чабаненко А. В. МОДЕЛЬ ПОДАЧИ ПОЛИМЕРА В ПРОЦЕССЕ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА 198

Чабаненко А. В., Рассыхаева М. Д. ИНТЕГРИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ПРОГРАММЫ TQM И SIX-SIGMA В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ..... 203

ВСТРОЕННЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

Петров А. Ю. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ПРОГРАММНЫХ РЕСУРСОВ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ 209

Симахина Е. А., Еремеев П. М., Балиж К. С. СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К УНИФИКАЦИИ ИНТЕРФЕЙСОВ В КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ..... 216

Суворова Е. А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ АВТОМАТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЗАИМОЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ПОТОКАМИ ДАННЫХ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ ЧЕРЕЗ ОБЩИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ 220

Шершнёв С. И., Ваганов М. А. РАЗРАБОТКА НАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВКИ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ 226

Научное издание

XXVI Международная научная конференция

ВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Сборник статей

Часть 3

ISBN: 978-5-8088-1844-6

9 785808 818446

Ответственный за выпуск
В. И. Казаков

Редакторская подготовка *С. В. Денисовой*
Компьютерная верстка *А. Н. Колешко*

Подписано к печати 23.05.2023. Дата выхода в свет: 29.05.2023. Формат 60×84 1/16.
Усл. печ. л. 13,7. Уч.-изд. л. 19,4. Тираж 150 экз. Заказ № 248.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Распространяется бесплатно