

УДК 621.396.6

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ФИЛЬТРА СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ РАДИОКОМПЛЕКСА СВЯЗИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**¹Шмелькова А.А., ¹Андреев В.В., ²Гурин В.М., ³Драч В.Е.**¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Калуга, e-mail: nastay31051999@gmail.com;²ООО «Фокон», Калуга, e-mail: vitally.gurin918@yandex.ru;³ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», Сочи, e-mail: rpd-admin@inbox.ru

Четкое соответствие теоретических и расчетных параметров приборов электронной техники реальным параметрам изготовленного прибора – важнейший вопрос для современного инженера-конструктора электронной аппаратуры, особенно работающего с космической техникой, где цена ошибки возрастает до невероятных высот. Основные разработки в космической сфере являются продуктом работ многих лет. Электроника развивается в быстром темпе, и удачные схемотехнические решения требуют адаптации с учетом новых стандартов приборостроения. При разработке фильтров, если учитывать паразитные связи между элементами, параметры сконструированного прибора часто не соответствуют теоретически ожидаемым. В настоящей статье проведен анализ и оптимизация конструкции фильтров для синтезатора частот, работающего в блоке приема и передачи радиочастотного сигнала космического аппарата. Целью работы является выявление расхождений расчетных параметров и параметров изготовленного прибора, а также определение причин данных расхождений и разработка рекомендаций по их минимизации. Проведено моделирование с учетом паразитных параметров в симуляторе электронных цепей. Составлены рекомендации по доработке и улучшению конструкции фильтров. Детально исследовано и промоделировано влияние элементов механического крепления на электромагнитные характеристики электрорадиоэлементов.

Ключевые слова: космический аппарат, фильтр, подавление помех, петлевой фильтр, синтезатор частот**FILTER DESIGN OPTIMIZATION OF THE FREQUENCY SYNTHESIZER OF THE SPACECRAFT COMMUNICATION RADIO COMPLEX****¹Shmelkova A.A., ¹Andreev V.V., ²Gurin V.M., ³Drach V.E.**¹Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch, Kaluga, e-mail: nastay31051999@gmail.com;²LLC «Fokon», Kaluga, e-mail: vitally.gurin918@yandex.ru;³Sochi State University, Sochi, e-mail: rpd-admin@inbox.ru

A clear correspondence of the theoretical and design parameters of electronic devices to the real parameters of the manufactured device is the most important issue for a modern electronic equipment design engineer, especially working with space technology, where the cost of error increases to incredible heights. The main developments in the space sector are the product of many years of developments. Electronics is developing at a fast pace and successful circuit solutions require adaptation to new instrumentation standards. When developing filters, if many parasitic connections are not taken into account, the parameters of the constructed device often do not correspond to theoretically predicted ones. This article analyzes and optimizes the design of filters for a frequency synthesizer operating in the radio frequency signal receiving and transmitting unit of a spacecraft. This article analyzes and optimizes the design of filters for a frequency synthesizer operating in the receiving and transmitting unit of the radio frequency signal of the spacecraft. The purpose of the work is to identify discrepancies between the design parameters and the parameters of the manufactured device, as well as to determine the causes of these discrepancies and develop recommendations for their minimization. The simulation is carried out taking into account parasitic parameters in the simulator of electronic circuits. Recommendations on the refinement and the improvement of the filter design have been compiled. The influence of mechanical fastening elements on the electromagnetic characteristics of electric radio elements has been studied in detail and modeled.

Keywords: spacecraft, filter, interference suppression, loop filter, frequency synthesizer

Несмотря на то, что исследования естественного спутника Земли – Луны – начались достаточно давно [1, 2], в настоящее время исследователи испытывают нехватку данных об этом объекте [3]. Поэтому разработка исследовательских аппаратов является актуальной задачей на данный момент. Для космических аппаратов, создаваемых по проекту исследования Луны [4, 5], разрабатывается радиокомплекс связи орбитального аппарата с посадочным аппаратом, расположенным на поверхности. В составе одного из функ-

циональных блоков комплекса, отвечающего за прием и передачу радиочастотного сигнала, применяется синтезатор частот, требовательный к питающему напряжению.

При разработке электронных блоков в космических аппаратах, в частности, отвечающих за прием и передачу радиочастотного сигнала [6], большое внимание уделяется выбору высоконадежной элементной базы, способной работать в различных критических условиях, в том числе и при воздействии радиационных излучений [7, 8].

Из-за разброса параметров компонентов фильтра или их паразитных параметров, а также из-за наличия собственной емкости и индуктивности монтажа зачастую параметры разработанного и собранного изделия не в полной мере соответствуют ожидаемым. Актуальной является задача нахождения причины пониженного коэффициента затухания помехоподавляющего фильтра, примененного в модуле связи космического летательного аппарата, при условии, что проверка по методике, утвержденной в технических условиях, не выявляет отклонений. Расхождение параметров можно отследить, применив прогрессивные комбинированные методики для исследования изготовленных на предприятии фильтров. Деграцией элементов [9–11], обусловленной излучением в условиях космоса, пренебрегаем.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выступает фильтр синтезатора частот радиокомплекса связи космического аппарата (далее – фильтр). В данной работе будут определены причины расхождения параметров фильтра и выдвинуты предложения по параметрической оптимизации прибора, для чего потребуется комбинировать лабораторные измерения реальных параметров и рассмотрение результатов симуляции компьютерной модели. Компьютерное моделирование выполнено в актуальной на данный момент версии системы автоматизированного проектирования QUCS [12], которая достоверно моделирует электрические схемы [13], в том числе фильтры [14].

Схема электрическая принципиальная рассматриваемого фильтра представлена на рис. 1, такое решение является классическим для подавления симметричных и несимметричных помех. Изменение структу-

ры в данном случае допускается в крайних случаях, поэтому усилия следует направить на параметрическую оптимизацию. Элементы Э на рис. 1 – это стандартные проходные керамические фильтры модели Б14, которые предназначены для подавления помех в верхней части частотного диапазона.

Требуемый коэффициент затухания в пределах рабочего диапазона должен составить не менее 60 дБ для частот 0,05–400 МГц. Промоделируем фильтр с идеальными параметрами, чтобы иметь эталонную амплитудно-частотную характеристику в качестве референса. Амплитудно-частотная характеристика одного канала фильтра представлена на рис. 2 (для второго канала результат будет идентичным). Здесь не учитываются ни взаимное влияние элементов, ни паразитные параметры компонентов. Следует отметить, что смоделированная амплитудно-частотная характеристика демонстрирует лишь работоспособность фильтра в общем случае и показывает характер отклика, но не дает количественной оценки его затухания. Оценить значения коэффициента затухания можно лишь на низких частотах, где еще не сказываются нелинейные параметры компонентов (это частоты до ~75 кГц в нашем случае). Полюс фильтра располагается вблизи 15 кГц, резкий скачок вблизи 3 МГц обусловлен резонансом среднего звена. Чтобы оценить параметры реального устройства, требуется дополнить компьютерную модель паразитными параметрами, которые являются неотъемлемой частью ВЧ-прибора в реальном мире.

Наибольшие трудности в лабораторных измерениях возникли при определении значений параметров, которые могут быть измерены лишь косвенными методами: емкость дросселя и эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора (англ. Equivalent Serial Resistance – ESR).

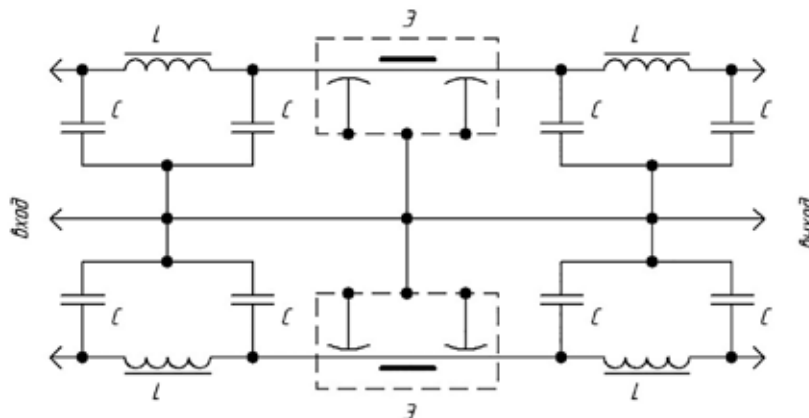


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная помехоподавляющего фильтра

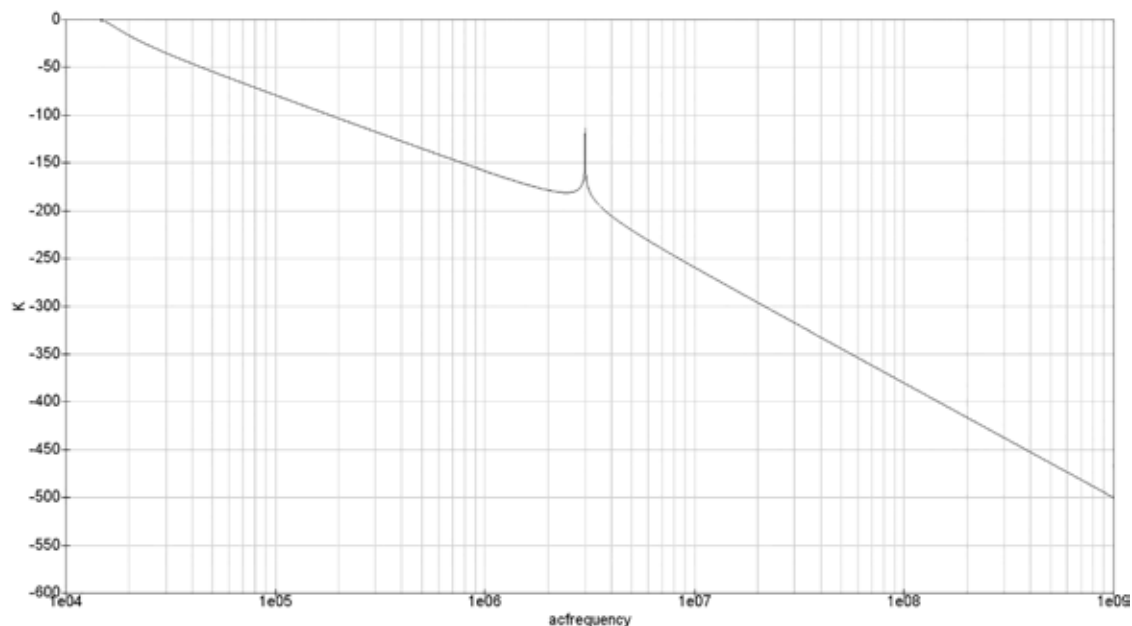


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика идеального фильтра

Эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора, как правило, не превышает доли Ом для высококачественных конденсаторов, но может достигать единиц Ом для особых партий или неудачных образцов. Для электролитических конденсаторов оно играет особенно важную роль. В лабораторных условиях эквивалентное последовательное сопротивление обычно измеряется путем подачи прямоугольного меандра амплитудой около 10 Вольт и частотой около 50 кГц на тестовый конденсатор, последовательно соединенный с низкоомным резистором, на котором измеряется падающее напряжение переменного тока.

Измерение паразитной емкости дросселя можно провести несколькими способами. Например, путем определения добротности (Q) колебательного контура, образованного индуктивностью и ее паразитной емкостью.

В рассматриваемом случае в контрольной выборке из партии компонентов Э средние значения измеренных параметров составили: 17 нГн для индуктивности фильтра и 1,67 пФ для паразитной емкости. Далее была измерена емкость у 20 дросселей, среднее значение составило 82,6 пФ.

Компьютерная модель фильтра, с учетом вышеизложенного, усложняется и принимает вид, приведенный на рис. 3. В этой модели учтены паразитные эквивалентное последовательное сопротивление конденсаторов, емкости и собственное сопротивление низкочастотных дросселей и керамического фильтра. Моделирование проведено для диапазона 10 кГц – 1 ГГц при входном и выходном сопротивлении равном 50 Ом.

На низкой частоте значения коэффициента затухания промоделированы весьма достоверно, поэтому уже на данном этапе исследования можно отметить, что требования технических условий не выполняются.

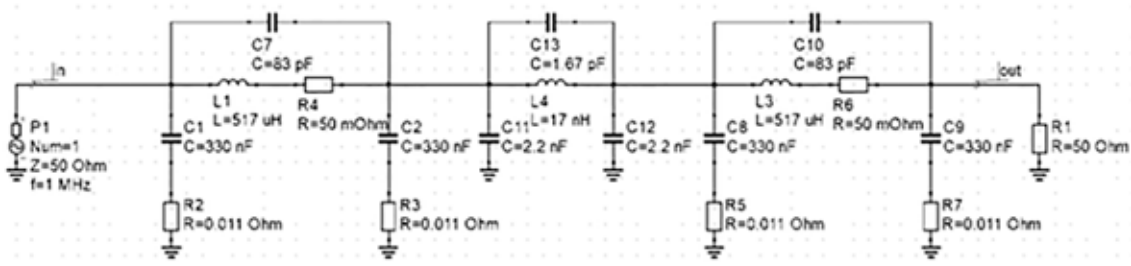


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная дополненной компьютерной модели

На частотах порядка 50 кГц можно улучшить затухание двумя путями: увеличив индуктивность дросселей или повысив емкость конденсаторов. Физические габариты корпуса жестко фиксированы для космического аппарата, поэтому для конкретного прибора рационально увеличение индуктивности дросселей (добавление определенного количества витков на магнитопровод), нежели наращивание емкости за счет установки массивных электролитов. Принимаем новое значение индуктивности в 1 мГн, что приводит к новому значению коэффициента затухания в -66 дБ, которое входит в допустимый диапазон. На высоких частотах найти причины несоответствия коэффициента затухания требуемому можно, построив амплитудно-частотную характеристику фильтра в режиме холостого хода и короткого замыкания, чтобы оценить влияние импеданса нагрузки. Проведем моделирование в диапазоне 100 Гц – 1 ГГц, изменяя значение сопротивления с помощью развертки параметра от 50 кОм (для режима холостого хода) и 0,5 Ом (для режима короткого замыкания).

При поиске возможных решений проблемы несоответствия параметров была выдвинута гипотеза о ключевом влиянии емкости керамических фильтров Б14 на коэффициент затухания. В результате была произведена отбраковка по емкости всех имеющихся в наличии фильтров, а в изделии были установлены фильтры с большими значениями емкости.

Оценим, как сильно на частотную характеристику изделия влияет емкость керамического фильтра в пределах допуска. Параметры моделирования остаются аналогичными, как и при исследовании режимов короткого замыкания и холостого хода. За счет изменения емкости керамического фильтра в диапазоне 1,8–2,8 нФ, удалось построить 6 амплитудно-частотных характеристик, почти полностью накладывающихся друг на друга. Таким образом, можно сделать заключение, что изменение емкости фильтра Б14 в пределах допуска не оказывает какого-либо влияния на частотную характеристику прибора.

Результаты исследования и их обсуждение

Излучающие свойства элементов конструкции начинают проявляться на частотах выше 200 МГц. Например, металлический винт, находящийся вблизи дросселя, начинает играть роль штыревой антенны: часть энергии отбирается и излучается в окружающее пространство. Если винт проходит через несколько экранированных отсеков устройства, то он превращается

в источник помех, так как становится проводником электромагнитного поля. В таком случае экранирование становится малоэффективным. Более того, крепежные элементы конструкции, которые можно представить как короткозамкнутые витки, будут мешать нормальной работе устройства на высокой частоте, что обусловлено переизлучением энергии.

Фильтр, рассматриваемый в данной работе, состоит из двух отсеков (экранированных стенками и перегородкой), в каждом из которых находится по два низкочастотных П-образных звена: половины верхнего канала и нижнего по схеме (рис. 1). Отсеки соединяются через керамический фильтр Б14. Дроссели каждого канала механически сопрягаются через общий винт, проходящий через оба отсека. Металлические клипсы применены для механического крепления низкочастотных конденсаторов на перегородке.

Общие крепежные винты для дросселей, очевидно, можно считать элементами, привносящими паразитные параметры в рассматриваемую конструкцию. Играя роль антенны, винт дополнительно выступает как общий магнитопровод для двух дросселей. Таким образом, для помех появляется обходной путь вокруг керамического фильтра, что приводит к уменьшению коэффициента затухания. Помимо этого, металлические клипсы крепления конденсаторов также начинают привносить паразитные параметры, поскольку они являются короткозамкнутыми витками.

Для оценки влияния элементов конструкции на частотные характеристики усложним модель, добавив элементы, как показано на рис. 4. Для создания общего магнитного поля между двумя катушками последовательно с ними включен трансформатор Tr1 с практически идеальными характеристиками: с единичным коэффициентом трансформации и малой индуктивностью обмоток. Трансформаторы Tr2-Tr5 с параметрами, аналогичными Tr1, включены последовательно с низкочастотными конденсаторами. Их первичная обмотка представляет индуктивность обкладок конденсатора, а вторичная обмотка – короткозамкнутый виток крепежной клипсы.

В итоге промоделирована амплитудная характеристика, представленная на рис. 5.

При таком подходе становится видно, что в диапазоне от 5 до 100 МГц коэффициент затухания резко спадает и становится намного меньше требуемого в -60 дБ. В других областях частотной характеристики затухание также ощутимо ослабло, хотя и осталось в пределах допуска.

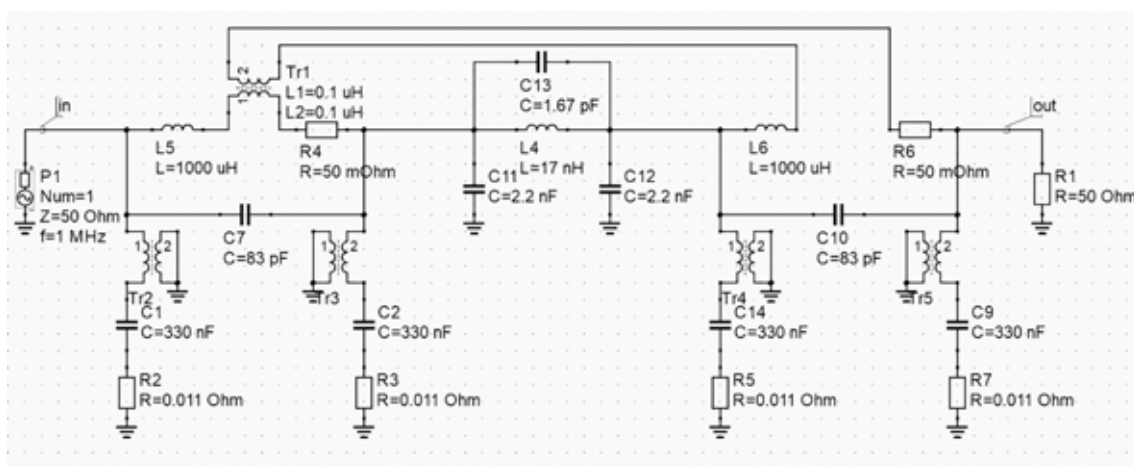


Рис. 4. Схема электрическая принципиальная фильтра в финальном варианте

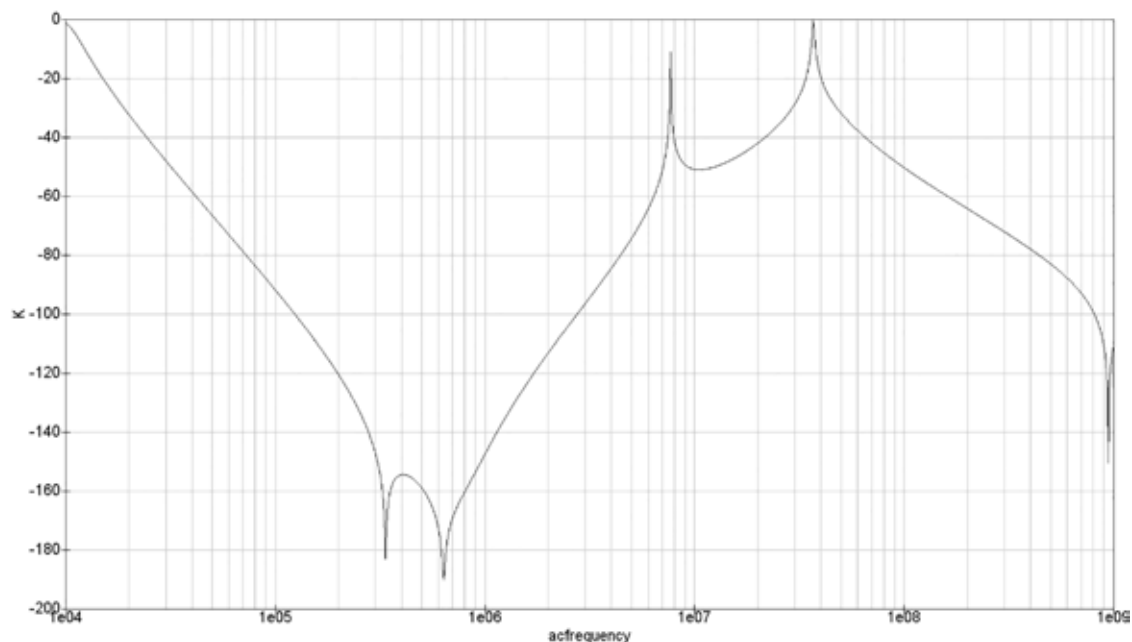


Рис. 5. Результирующая амплитудно-частотная характеристика компьютерной модели

Заключение

В результате исследования было установлено, что рассматриваемый фильтр по своим параметрам не обеспечивает необходимого затухания в высокочастотной и низкочастотной областях диапазона. Требуется увеличить индуктивность низкочастотных дросселей для увеличения коэффициента затухания в нижней области диапазона. Параметры керамических фильтров и емкостей не оказывают существенного влияния на работу прибора. Заметно ухудшают характеристики фильтра, как оказалось, крепления низкочастотных дросселей, (обеспечивающих паразитную емкостную связь между отсеками) и крепления

конденсаторов (представляющие собой короткозамкнутый виток). Требуется изменить способ крепления компонентов для оптимизации электрофизических параметров. Можно предложить для достижения этой цели заменить материал крепления дросселя (с металла на полиамид). В качестве материала крепления дросселей необходимо выбирать диэлектрик.

Список литературы

1. Черкасова Л.И. История первых исследований механических свойств грунтов Луны // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2022. № 3. С. 15–18.
2. Черкасова Л.И. Исследования грунтов Луны. История и перспективы // Вестник МГСУ. 2011. № 5. С. 301.

3. Попандопуло Н.А., Александрова А.Г., Томилова И.В., Авдюшев В.А., Бордовицына Т.В. Численное моделирование динамики искусственных спутников Луны // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. 2022. Т. 56, № 4. С. 266–284.
4. Рубцова А.С. Исследование системы управления посадкой космического летательного аппарата «Луна-Глоб» на участке прецизионного торможения // *Автоматизация. Современные технологии*. 2022. Т. 76, № 4. С. 179–184.
5. Дудоров Е.А. Робототехнические системы космического назначения // *Космическая техника и технологии*. 2022. № 3 (38). С. 66–81.
6. Коровин А.К. Математическая модель системы функционирования космических аппаратов связи // *Стратегическая стабильность*. 2021. № 1 (94). С. 2–6.
7. Абдурахимов А.А., Скворцов Д.В. Моделирование деградации крупногабаритных уязвимых элементов космических аппаратов в условиях воздействия факторов космического пространства // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. 2016. № 650. С. 132–137.
8. Esqueda I.S., Varnaby H.J., King M.P. Compact modeling of total ionizing dose and aging effects in MOS technologies // *Transactions on Nuclear Science*. 2015. Vol. 62, Is. 4. P. 1501–1515.
9. Драч В.Е., Смирнова О.М., Чухраев И.В. Генерация заряда в транзисторах с наноразмерным диэлектриком // *Вопросы радиоэлектроники*. 2012. Т. 1, № 3. С. 115–122.
10. Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Дегтярев В.Т., Столяров А.А., Драч В.Е. Моделирование процессов сильно-полевой инжекционной модификации и деградации МДП-структур // *Перспективные материалы*. 2004. № 2. С. 20–27.
11. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Modification of MIS Devices by Radio-Frequency Plasma Treatment // *Acta Phys. Pol. A*. 2019. Vol. 136, Is. 2. P. 263–266.
12. Кечиев Л.Н., Крючков Н.М., Кузнецов В.В. Симулятор QUCS: основные возможности // *Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий*. 2015. Т. 1. С. 398–400.
13. Драч В.Е., Корчинова А.Е. Повышение уровня стабилизации драйвера светодиодов // *Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2016. № 1 (26). С. 10–16.
14. Дубинина М.С., Рыжов С.В., Крючков Н.М., Кузнецов В.В. Инструмент для синтеза фильтра Лежандра и катушек индуктивности в САПР QUCS // *Технологии электромагнитной совместимости*. 2017. № 4 (63). С. 42–47.