

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

XIV Международная научно-практическая конференция

# ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

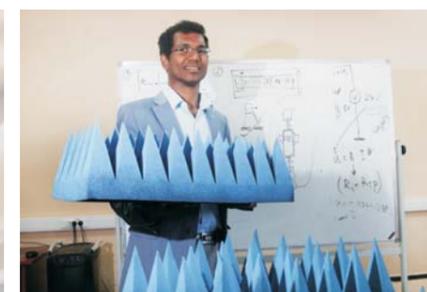
Материалы докладов

г. Томск

28–30 ноября 2018 г.

В двух частях

ЧАСТЬ 1



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

# **ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

**XIV Международная научно-практическая конференция**

**28–30 ноября 2018 г.**

**Материалы докладов**

**В двух частях**

**Часть 1**

В-Спектр  
Томск – 2018

**УДК 621.37/39 + 681.3**  
**ББК (Ж/О) 32.84.85.965**  
**Э 45**

Э 45 **Электронные средства и системы управления:** материалы докладов XIV Международной научно-практической конференции (28–30 ноября 2018 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2018. – 348 с.  
ISBN 978-5-91191-401-1  
ISBN 978-5-91191-402-8 (Ч. 1)  
ISBN 978-5-91191-403-5 (Ч. 2)

Сборник содержит материалы докладов, представленных на XIV Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 28–30 ноября 2018 г.), по следующим направлениям: радиотехнические и телекоммуникационные системы; наноэлектроника СВЧ; нанотехнологии в электронике; антенны и микроволновые устройства СВЧ; нелинейная оптика; интеллектуальная силовая электроника и преобразовательная техника; плазменная электроника; биомедицинская электроника; автоматизация и оптимизация систем управления и обработка информации; интеллектуальные системы проектирования, автоматизация проектирования электронных устройств и систем; информационная безопасность; информационные технологии в управлении и принятии решений; информационные технологии в обучении; инновации в сфере электроники и управления; оптоэлектроника и фотоника; видеоинформационные технологии и цифровое телевидение.

Для студентов, преподавателей и специалистов, интересующихся проблемами систем управления.

УДК 621.37/39 + 681.3  
ББК (Ж/О) 32.84.85.965

*Конференция проводится при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).  
Проект № 18-07-20094*

*Часть статей секций 2–22 направлена для публикации  
в журнале «Доклады ТУСУРа»*

ISBN 978-5-91191-401-1  
ISBN 978-5-91191-402-8 (Ч. 1)

© ТУСУР, 2018  
© Коллектив авторов, 2018

## СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО «КЕЙСАЙТ ТЕКНОЛОДЖИЗ»



ООО «Кейсайт Текнолоджиз»  
Россия, 115054, г. Москва,  
Космодамианская наб., 52, стр. 3.

Тел.: 495 797 39 00  
Факс: 495 797 39 02  
[www.keysight.ru](http://www.keysight.ru)

Keysight Technologies – мировой технологический лидер на рынке контрольно-измерительных решений для электронной, оборонной, аэрокосмической и телекоммуникационной промышленности.

Как самостоятельная компания Keysight Technologies была образована в 2014 г. в результате стратегического разделения компании Agilent Technologies, которая, в свою очередь, до 1999 г. входила в корпорацию Hewlett-Packard. Первый измерительный прибор под маркой Hewlett-Packard был выпущен более 75 лет назад.

В настоящий момент компания Keysight Technologies предоставляет самый широкий на рынке спектр лабораторных, модульных и портативных контрольно-измерительных приборов, в том числе оборудование для радиоизмерений (генераторы сигналов, анализаторы сигналов, анализаторы цепей), осциллографы и приборы общего назначения (мультиметры, источники питания, генераторы импульсов, системы сбора данных, логические анализаторы, ручные приборы), решения для тестирования телекоммуникаций, а также системы автоматизированного проектирования и моделирования электронных устройств.

В России приборы Keysight Technologies, ранее производимые под маркой Hewlett-Packard / Agilent, используются уже более 45 лет и по праву считаются наиболее точным и надежным контрольно-измерительным оборудованием на рынке.

Российский офис компании Keysight Technologies предлагает своим клиентам локальную техническую и сервисную поддержку, техническую документацию на русском языке. Для серий малогабаритных осциллографов, генераторов сигналов и анализаторов спектра разработаны русскоязычные интерфейсы пользователя. На большинство приборов есть сертификаты об утверждении типа средств измерений. На постоянной основе ведется работа по включению в Госреестр новых приборов Keysight Technologies.

Среди крупнейших заказчиков Keysight Technologies в России ведущие научно-исследовательские институты, конструкторские бюро, вузы, крупнейшие операторы связи.

В 2012 г. компания Keysight Technologies открыла два дополнительных региональных офиса в России – в Приволжском и Сибирском федеральных округах. В 2013 г. дополнительный офис открыт в Ростове-на-Дону, в 2014 г. – в Санкт-Петербурге.

Информация о компании Keysight Technologies доступна в сети Интернет по адресу: [www.keysight.ru](http://www.keysight.ru)

*Генеральный директор ООО «Кейсайт Текнолоджиз»  
Смирнова Галина Владимировна*

## СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО «ЛЕКРОЙ РУС»



ООО «ЛеКрой РУС»  
119071, г. Москва, 2-й Донской  
проезд, д. 10, стр. 4, 2-й этаж

Тел.: 495 777-5591  
Факс: 495 640-3023  
<https://prist.ru/>

Компания «ПриСТ» основана в 1994 г. Сегодня АО «ПриСТ» один из крупнейших российских поставщиков приборов для электроизмерений, радиоизмерений и измерений параметров окружающей среды (<https://prist.ru/>).

В компании работает более 80 высококвалифицированных сотрудников, открыты представительства в Санкт-Петербурге и Екатеринбурге, имеется дилерская сеть по всей территории России, дилеры в Белоруссии и Казахстане.

Основные виды деятельности:

- Поставки измерительного оборудования.
- Технические консультации по подбору средств измерения и вариантам замен приборов, снятых с производства или морально устаревших.
- Услуги по поверке и калибровке СИ.
- Услуги по техническому обслуживанию СИ, включая закрытую калибровку.
- Услуги автоматизации процессов поверки и калибровки.
- Испытания для целей утверждения типа СИ.
- Сервисная поддержка, гарантийное и послегарантийное обслуживание.
- Предоставление СИ в арендное пользование.

Компания «ПриСТ» является эксклюзивным поставщиком на территории России и СНГ продукции таких компаний, как APPA, Center, Good Will Instrument, SEW, Tabor Electronics, Teledyne LeCroy и Wayne Kerr Electronics. Дистрибьюторские и партнерские соглашения связывают компанию со всемирно известными производителями: Anritsu, Fluke, Keysight, National Instruments, Rohde&Schwarz, Pendulum, Spectracom, TDK-Lambda, Pico Technology.

С 2004 г. АО «ПриСТ» представляет на российском рынке компанию LeCroy (с 2012 г. Teledyne LeCroy) – одного из мировых лидеров в разработке и производстве цифровых осциллографов. Осциллографы высочайшего класса помогают инженерам-конструкторам и учёным осуществлять наблюдение, измерение и анализ сигналов в электронных цепях и трактах различных устройств. Компания «Teledyne LeCroy» является одним из технологических лидеров на рынке цифровых осциллографов. Это подтверждают ее достижения, например, в 2013 г. компания представила многоканальную систему с полосой пропускания 100 ГГц в режиме реального времени. В том же 2013 г. были представлены осциллографы высокого разрешения (HDO) с 12-битным АЦП и полосой пропускания 1 ГГц. Семейство осциллографов HDO существенно изменило представление о точности измерений, доступной цифровым осциллографам. 2018 год ознаменовался выходом новой серии осциллографов высокого разрешения WavePro HDR, которая обеспечивает теперь высокоточные измерения в полосе до 8 ГГц. Кроме цифровых осциллографов, компания «Teledyne LeCroy» выпускает анализаторы протоколов. Это широкий класс приборов для тестирования устройств передачи данных как на физическом, так и на логическом уровне. В этой области «Teledyne LeCroy» также занимает лидирующие позиции и предоставляет решения для всех современных протоколов передачи последовательных данных (<http://lecroy-rus.ru/>).



4. Gazizov T.R. Experimental results on ultra wide band pulse propagation in three-conductor power cables of flat and circular cross sections / T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, I.E. Samotin // Proc. of Int. Siberian conf. on control and communications (SIBCON-2009). Russia, Tomsk. March 27–28, 2009. – 2009. – P. 264–269.

5. Самойличенко М.А. Разложение сверхкороткого импульса в модальном фильтре с пассивным проводником в опорной плоскости / М.А. Самойличенко, Т.Т. Газизов // Матер. XII Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 16–18 ноября, 2016. – Ч. 1. – С. 222–224.

6. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.

---

**Самойличенко Мария Александровна**  
Аспирантка каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: 1933mary2011@mail.ru

УДК 621.389

**А.А. Собко**

## Обзор пассивных устройств подавления кондуктивных электромагнитных помех

Проведен обзор пассивных устройств подавления кондуктивных электромагнитных помех (ЭМП) в цепях питания, управления и коммутации РЭА. Представлен обзор конструкций традиционных и современных помехоподавляющих устройств. Уделено внимание плоскостным фильтрам и конструкциям так называемых мультитрактных проводников, и их применению в области фильтрации кондуктивных ЭМП.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, электромагнитные помехи, кондуктивные помехи, фильтры, LC-звенья, проходные конденсаторы, мультитрактные проводники.

Одной из важных задач в современной электронике является защита электрооборудования от внешних и внутренних электромагнитных помех (ЭМП). Увеличение количества радиоэлектронных средств (РЭС), усложнение их функций, рост мощности излучения приводят к усложнению электромагнитной обстановки и созданию ЭМП, что значительно снижает надежность передачи, приема и обработки информации. Борьба с ЭМП всегда была одной из серьезных проблем при создании и эксплуатации РЭС. Наиболее опасными являются кондуктивные помехи, распространяющиеся в цепях питания, управления, коммутации и т.д. Появление таких помех, как правило, вызвано недостаточным сглаживанием напряжения источника питания, паразитными связями элементов устройства с цепью питания и неэквипотенциальностью точек заземления отдельных элементов РЭС. Для борьбы с такими помехами широко используются фильтры ЭМП, обеспечивающие электрическую развязку источников помех и защищаемого оборудования, не нарушая работоспособности системы.

Известны различные оценки электромагнитных помех [1, 2], снижение шумов с помощью конкретных схемотехнических решений [3–6] или создания специальных фильтров для ослабления помеховых выбросов [7–11]. Защита от ЭМП обычно осуществляется с помощью пассивных компонентов. Например, чтобы уменьшить помехи во входных и выходных цепях импульсных источников вторичного электропитания, используются встроенные и внешние фильтры ЭМП [12]. При этом пассивные фильтры состоят из крупных компонентов, которые увеличи-

вают объем и массу до 33% от устройства. К сожалению, в отечественных источниках данный вопрос раскрыт слабо, в особенности в освещении новых разработок. Например, в последние годы вызывает большой интерес идея плоскостных фильтров на базе мультитрактных проводников. Наиболее актуальной областью применения этой технологии является авионика, в которой экономия объема и массы имеет первостепенное значение. Фильтры ЭМП на базе мультитрактных проводников компактнее, имеют хорошие высокочастотные характеристики, а также низкие паразитные эффекты [13], что отличает их от традиционных.

Цель работы – представить обзор пассивных устройств подавления кондуктивных электромагнитных помех.

Традиционно фильтры ЭМП характеризуются такими параметрами, как вносимое затухание, частота среза, рабочий ток, рабочее напряжение и рабочий диапазон температур. Из них стоит выделить важность вносимого затухания и частоты среза. Вносимое затухание рассчитывают в децибелах как отношение напряжений помехи на нагрузке без фильтра к напряжению с включенным фильтром. Согласно ГОСТ 13661-92, вносимое затухание измеряется при сопротивлении 50 Ом на входе и выходе фильтра. На частоте среза вносимое затухание фильтра равно 3 дБ.

### Фильтры на основе проходного конденсатора

Конструктивно помехоподавляющие фильтры представляют собой сочетание емкостных и индук-

тивных элементов, соединенных в различные (С, Г, П или Т) электрические схемы (рис. 1). При этом фильтры на основе стандартных керамических конденсаторов не всегда дают достаточное снижение уровня помех в электрических цепях. Высокочастотные характеристики традиционных двухвыводных конденсаторных фильтров ограничены паразитными эффектами [14–17]. В связи с этим часто используют проходные трехвыводные конденсаторы, позволяющие осуществлять хорошую фильтрацию и понижение помех на радиочастотах. Сигнал с помехами поступает на вход проходного конденсатора, помеховые составляющие замыкаются через емкость на «землю», сигнал без помех поступает на выход. Проходные конденсаторы отличаются низкой паразитной индуктивностью по сравнению со стандартными керамическими конденсаторами, что является преимуществом. Благодаря этому они позволяют подавлять помехи на более высоких частотах, при этом часто используются совместно со стандартными конденсаторами.

*С-фильтр* (рис. 1, а) представляет собой проходной конденсатор с тремя выводами. Он является наименее затратным средством подавления помех и рекомендуется к установке в устройствах высокоскоростного переключения и в цифровых устройствах, так как он имеет низкую собственную индуктивность. При этом значение емкости следует выбирать исходя из наибольшей рабочей частоты.

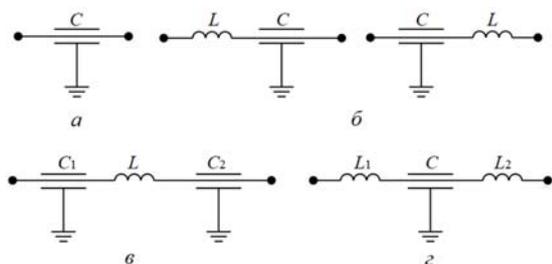


Рис. 1. Схемы помехоподавляющих фильтров: С (а); Г (б); П (в) и Т (г)

*Г-фильтр* (рис. 1, б) состоит из индуктивного и одного емкостного элементов. Индуктивный элемент может представлять собой кольца или трубки из термостабильного феррита, надетые на центральный вывод фильтра. В этой схеме возможны два варианта включения  $L$ - и  $C$ -элементов, обычно применяемые при низком импедансе источника (слева) и высоком импедансе нагрузки (справа).

*П-фильтр* (рис. 1, в) наиболее эффективен в случаях, если сопротивления источника и нагрузки неизвестны или отличаются друг от друга. Наличие второго конденсатора значительно улучшает эффективность подавления помех. Однако  $P$ -фильтр не рекомендуется использовать в цепях коммутации, так как его применение предполагает наличие высокого импеданса как источника, так и нагрузки.

*Т-фильтр* (рис. 1, г) предназначен для применения в цепях коммутации при низких сопротивлениях источника и нагрузки. Также возможно применение сдвоенных  $P$ - и  $T$ -схем.

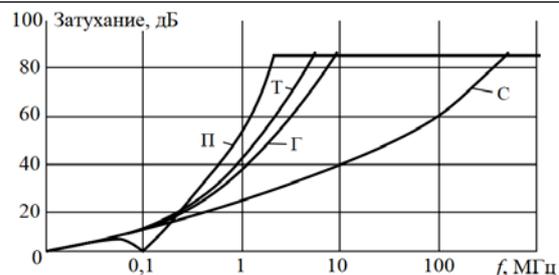


Рис. 2. Частотные зависимости вносимого затухания

Как видно из частотных зависимостей (рис. 2) вносимого затухания рассмотренных фильтров, эффективность подавления ЭМП у  $\Gamma$ -,  $T$ - и  $P$ -фильтров значительно выше, чем у  $C$ -фильтров.

### Сетевые помехоподавляющие фильтры

При устранении электромагнитных помех для соблюдения стандартов ЭМС разработка фильтра ЭМП становится серьезной задачей. В большинстве случаев фильтры ЭМП представляют собой схемы фильтрации синфазной и дифференциальной составляющей помех [18]. Дифференциальная помеха распространяется между сигнальным и нейтральным проводниками. Синфазная помеха распространяется между проводником и корпусом или шиной заземления через паразитные емкости. Для подавления дифференциальных помех устанавливаются фильтры в линии сигнала или питания. Для подавления синфазных помех фильтры устанавливаются во всех линиях, по которым распространяются помехи. Применяют фильтры дифференциального типа, где используется синфазный дроссель и шунтирующие конденсаторы между шиной и обратным проводом. Такая схема (рис. 3) является звеном сетевого фильтра и должна быть частью любого низкочастотного фильтра силовых шин электропитания (СШЭП).

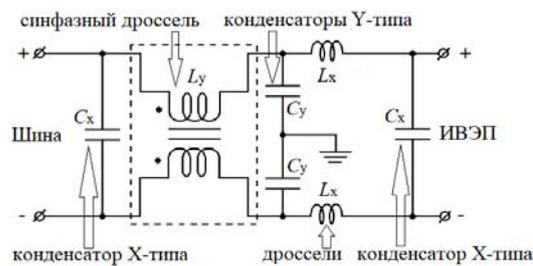


Рис. 3. Схема однофазного сетевого фильтра

Синфазный дроссель  $L_y$  выполняется на сердечнике с большой магнитной проницаемостью и имеет две идентичные обмотки. Полярность включения обмоток такова, что для дифференциальных токов они имеют малое, а для синфазных высокое сопротивление. Конденсаторы  $C_y$  включены между фазой, нейтралью и «землей» и предназначены для шунтирования синфазных помех. Конденсаторы  $C_x$  включены между фазой и нейтралью с дросселями  $L_x$  и предназначены для подавления дифференциальных помех. Такая схема является двунаправленной и позволяет подавлять помехи как от СШЭП к источнику вторичного электропитания (ИВЭП), так

и в обратном направлении. Увеличение емкостей  $C_x$  улучшает фильтрацию дифференциальных помех, но приводит к увеличению реактивного сопротивления. Увеличение емкости конденсатора  $C_y$  улучшает фильтрацию синфазных помех, но увеличивает ток утечки. Увеличение индуктивности дросселей улучшает фильтрацию, но приводит к увеличению активного сопротивления обмоток. Поэтому проектирование сетевого фильтра требует соблюдения баланса между номиналами компонентов фильтра.

Схема получила широкое распространение благодаря возможности высокого (до 80 дБ) подавления высокочастотных (до 30 МГц) помех. Однако для расчетов характеристик подобного фильтра необходимо учитывать паразитные параметры компонентов, неучет которых увеличивает передаточную функцию фильтра [19].

### Плоскостные фильтры

Существуют различные плоскостные фильтры ЭМП, например состоящие из нескольких слоев проводников, изоляции и ферромагнитного слоя сердечника (рис. 4, а), конструктивно представляющие собой интегральную структуру. ЭМП имеют повышенные высокочастотные характеристики в сравнении с традиционными и при этом меньшие размеры, в особенности вертикальные [20]. Похожие плоскостные фильтры ЭМП (рис. 4, б) на основе многослойной линии передачи изготавливаются из нескольких слоев различных проводящих материалов, в которых поглощается высокочастотная составляющая сигнала. Фильтр обеспечивает повышенные частотные характеристики при меньших размерах [21].

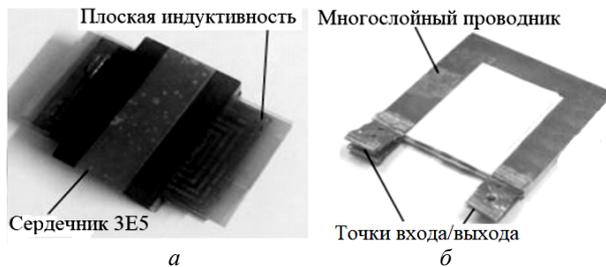


Рис. 4. Фильтры ЭМП: плоскостный (а) и на основе многослойной линии передачи (б)

### Мультитрактные проводники (Multipath conductors)

Традиционным фильтрам ЭМП свойственны слабое подавление высокочастотных помех и сильное влияние паразитных параметров, в то же время к бортовой РЭА и многим другим электротехническим средствам предъявляют серьезные требования по подавлению ЭМП. Снизить влияние этих недостатков можно с помощью диссипативной (рассеивающей) структуры мультитрактных фильтров ЭМП [22]. Использование подобной структуры позволит уменьшить объем, массу и стоимость фильтров ЭМП. Фильтры ЭМП на основе линии передачи могут использоваться в качестве низкочастотных поглощающих фильтров с повышенным помехопо-

давлением на высоких частотах. Подобные фильтры в микрополосковом исполнении можно интегрировать в печатные платы. Отмечается [23] хорошее теплоотведение за счет того, что большая часть фильтра представляет собой гладкую поверхность. Например, мультитрактный фильтр ЭМП из нескольких слоёв проводников с различной проводимостью и проницаемостью [22] (рис. 5) из меди и никеля. Для изоляции используется керамический диэлектрик марки Y5V.



Рис. 5. Фильтр ЭМП на основе линии передачи

Высокочастотная дифференциальная составляющая тока благодаря скин-эффекту вытесняется в проводники никеля. Проводимость проводника никеля ниже, чем медного, поэтому высокочастотная составляющая энергии сигнала рассеивается в проводниках никеля, а синфазная составляющая шунтируется на «землю» через емкость, создаваемую внешним и внутренним слоями проводников никеля [13].

### Конструкции мультитрактных проводников

Различают две типовые конструкции: плоскую и цилиндрическую (рис. 6) [24].

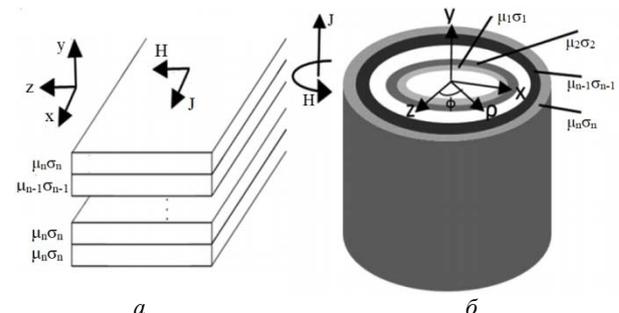


Рис. 6. Конструкции многослойных проводников: плоского (а) и цилиндрического (б)

Каждый проводник состоит из  $n$  отдельных проводящих слоев, каждый из которых имеет собственные электрические и магнитные свойства. Значение  $n$  выбирается исходя из области применения и рассматриваемой проблемы. Ток, протекающий внутри такого проводника, будет распределяться между слоями в зависимости от свойств проводников, независимо от природы возникновения помехи – внутренняя из источника или индуцируемая внешним ЭМП. На рис. 6, а показано, что магнитное поле, создаваемое током, параллельно поверхности проводника и ограничивается плоскостью, в которой лежит проводник. Если в плоском многослойном

проводнике ток течет в направлении  $x$ , тогда магнитное поле будет нарастать в направлении  $z$ , а если в цилиндрическом многослойном проводнике (рис. 6, б) ток течет в направлении  $y$ , то магнитное поле будет нарастать в азимутальном направлении плоскости  $xу$ . Подобная конструкция применима в фильтрах ЭМП, коаксиальных кабелях и для экранирования ЭМП. Скин-эффект и эффект близости в цилиндрических многослойных проводниках приводят к вытеснению помеховых токов в слои с низкой проводимостью, где электромагнитная энергия помехи преобразуется в тепловую.

Равновесная модель цилиндрической линии передачи с различными металлическими слоями, учитывающая потери, представлена в [24]. Модель позволяет рассчитать плотность тока и рассеяние мощности в любом конкретном проводящем слое в мультитрактовом проводнике.

В [25] предложен аналитический метод расчета для определения плотности тока и напряженности магнитного поля на разных вертикальных расстояниях внутри мультитрактовых проводящих конструкций через систему уравнений, полученную из основе уравнений Максвелла. Предложенным методом можно определить частотно-зависимые сопротивления и внутреннюю индуктивность для мультитрактовых проводников с различными проводящими материалами. Также в [25] подробно описаны расчеты с помощью предложенного аналитического метода и сравнение с результатами электродинамического моделирования методом конечных элементов. Для расчета сопротивления и индуктивности на заданных частотах и амплитудах тока существует подход с упрощенными комплексными вычислениями [28]. Уравнения, используемые в нем, позволяют упростить процессы анализа и проектирования фильтров ЭМП.

Процессы изготовления таких фильтров схожи с процессами производства в полупроводниковой промышленности [13]. При этом простая автоматизированная сборка таких фильтров позволит изготавливать устройства с высокой точностью и хорошей повторяемостью характеристик [23]. Идею мультитрактового проводника можно использовать для создания высоковольтной линии передачи, имеющей характеристику фильтра нижних частот, т.е. линии передачи способной смягчать высокочастотные скачки и всплески напряжения, что позволяет создать проводник с молниезащитой. Это одна из перспективных областей, которая пока не исследована.

Однако, несмотря на преимущества мультитрактовых фильтров ЭМП, есть препятствия для их широкомасштабного применения. Как правило, довольно легко изготавливать многослойные печатные платы с произвольным количеством слоев с произвольной толщиной меди. Тем не менее пока еще нет общепринятой технологии для интеграции других проводящих материалов в процесс производства.

Несмотря на ряд преимуществ, на высокочастотные характеристики фильтров влияют некоторые

такие параметры, как эквивалентная параллельная емкость (ЕРС), которая может снизить эффективность плоскостных фильтров ЭМП, особенно при работе на высоких частотах. Как описано в [16, 17, 29], фактически это основной паразитный параметр фильтров ЭМП. Даже очень маленькие паразитные ёмкости способны привести к повышению частоты среза до нескольких сотен килогерц [17]. Поэтому для обеспечения хороших высокочастотных характеристик необходимо минимизировать паразитную емкость. Один из способов для этого подробно рассмотрен в [16]. Работа плоскостных фильтров ЭМП на высоких частотах также осложняется наличием эквивалентной последовательной индуктивности. Хотя индуктивность плоскостного интегрального фильтра, безусловно, мала [17], частота среза может подняться до нескольких мегагерц [17, 29]. Решения этой задачи двумя различными способами обсуждаются в [17].

#### Заключение

Таким образом, проведен обзор устройств фильтрации ЭМП, описаны традиционные схемы фильтров цепей питания и коммутации, особенности применения, приведены рекомендации. Представлен обзор современных разработок, в том числе и мультитрактовых проводников, описаны их преимущества и недостатки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.

#### Литература

1. Wang S. Developing parasitic cancellation technologies to improve EMI filter performance for switching mode power supplies / S. Wang, R. Chen, J.D. van Wyk et al. // IEEE Trans. Electromagn. Compat. – Nov. 2005. – Vol. 47, No. 4. – P. 921–929.
2. Chen X. Novel inverter-output passive filter for reducing both differential- and common-mode  $dv/dt$  at the motor terminals in PWM drive systems / X. Chen, D. Xu, F. Liu, J. Zhang // IEEE Trans. Ind. Electron. – Feb. 2007. – Vol. 54, No. 1. – P. 419–426.
3. Ogasawara S. An active circuit for cancellation of common-mode voltage generated by a PWM inverter / S. Ogasawara, H. Ayano, H. Akagi // IEEE Trans. Power Electron. – Sep. 1998. – Vol. 13, No. 5. – P. 835–841.
4. Julian A.L. Elimination of common-mode voltage in three-phase sinusoidal power converters / A.L. Julian, G. Oriti, and T.A. Lipo // IEEE Trans. Power Electron. – Sep. 1999. – Vol. 14, No. 5. – P. 982–989.
5. A hybrid EMI filter with ultra-wide bandwidth / W.C. Ho, C.K. Lee, X. Liu et al. // in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. – Feb. 24–28, 2008. – P. 676–681.
6. Farkas T. Viability of active EMI filters for utility applications / T. Farkas, M.F. Schlecht // IEEE Trans. Power Electron. – May 1994. – Vol. 9, No. 3. – P. 328–336.
7. Hamili D.C. An efficient active ripple filter for use in DC-DC conversion // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – Jul. 1996. – Vol. 32, No. 3. – P. 1077–1084.
8. Poon N.K. Techniques for input ripple current cancellation: classification and implementation / N.K. Poon, J.C.P. Liu, C.K. Tse, M.H. Pong // IEEE Trans. Power Electron. – Nov. 2000. – Vol. 15, No. 6. – P. 1144–1152.

9. Zhu M. Design and evaluation of feedforward active ripple filters / M. Zhu, D.J. Perreault, V. Caliskan et al. // IEEE Trans. Power Electron. – Mar. 2005. – Vol. 20, No. 2. – P. 276–285.
10. Chow A.C. Design and evaluation of a hybrid passive/active ripple filter with voltage injection / A.C. Chow, D.J. Perreault // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – Apr. 2003. – Vol. 39, No. 2. – P. 471–480.
11. Wang S. Characterization, evaluation and design of noise separator for conducted EMI noise diagnosis / S. Wang, F.C. Lee, W.G. Odendaal // IEEE Trans. Power Electron. – Jul. 2005. – Vol. 20, No. 4. – P. 974–982.
12. Затулов С. Модули фильтрации радиопомех и защиты от перенапряжений для питающих цепей постоянного и переменного тока / С. Затулов, А. Миронов, И. Твердов // Силовая электроника. – 2007. – № 14. – С. 56–59.
13. Luo F. Design of a hybrid busbar filter combining a transmission line filter and a one-turn inductor for DC-fed three-phase motor drive systems / F. Luo, A.C. Baisden, D. Boroyevich et al. // IEEE Trans. Power Electron. – 2013. – Vol. 28, No. 12. – P. 5588–5602.
14. Chen L.J. Implementation of a compact EMI filter array for 4G-LTE applications on LTCC / L.J. Chen, K.H. Lin // IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol. – Jun. 2015. – Vol. 5, No. 6. – P. 713–722.
15. Improved model of T-type LC EMI chip filters using new microstrip test fixture / A.B. Menicanin, M.S. Damnjanovic, L.D. Zivanov, O.S. Aleksic // IEEE Trans. Magn. – Oct. 2011. – Vol. 47, No. 10. – P. 3975–3978.
16. Series-connected grounding of common-mode EMI filter / H. Chen, P. Meng, J. Li, Z. Qian // IEEE Trans. Electromagn. Compat. – Nov. 2010. – Vol. 52, No. 4. – P. 1066–1068.
17. Techniques for improving the high-frequency performance of the planar CM EMI filter / H.F. Huang, L.Y. Deng, B.J. Hu, G. Wei // IEEE Trans. Electromagn. Compat. – Oct. 2013. – Vol. 55, No. 5. – P. 901–908.
18. Chen W. An experimental study of common and differential-mode active EMI filter compensation characteristics / W. Chen, W. Zhang, X. Yang et al. // IEEE Trans. Electromagn. Compat. – 2009. – Vol. 51, No. 3. – P. 683–691.
19. Murata Y. Analysis of parasitic couplings in EMI filters and coupling reduction methods. / Y. Murata, K. Takahashi, T. Kanamoto, M. Kubota // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – December 2017. – Vol. 59, No. 6. – P. 1880–1886.
20. Chen R. Improving the characteristics of integrated EMI filters by embedded conductive layers. / R. Chen, J.D.V. Wyk, S. Wang et al. // IEEE Trans. Power Electron. – 2005. – Vol. 20, No. 30. – P. 611–619.
21. Wolmarans P.J. Technology for integrated RF-EMI transmission line filters for integrated power electronic modules. / P.J. Wolmarans, J.D. Van Wyk, J.D.Jr. Van Wyk, et al. // IEEE Industry Applications Conf. 37th IAS Annual Meeting. – Pittsburgh, PA, USA. – 2002. – Vol. 3. – P. 1774–1780.
22. Power electronic interconnects: skin- and proximity effect-based frequency selective multipath propagation. / J.D.Jr. van Wyk, W.A. Cronje, J.D. van Wyk, et al. // IEEE Trans. Power Electron. – 2005. – Vol. 20, No. 3. – P. 600–610.
23. Ouyang Z. Overview of planar magnetic technology-fundamental properties / Z. Ouyang, M.A.E Andersen // IEEE Trans. Power Electron. – 2014. – Vol. 29, No. 9. – P. 4888–4900.
24. Brink E.A. Aspects of electromagnetic field distributions in multipath conductive structures: Dissertation, University of Witwatersrand. – Johannesburg, South Africa, 2011.
25. Brink E.A. Analytical approach for determining the frequency-dependent characteristics of multipath conductive structures / E.A. Brink, I.W. Hofsjager // IEEE Trans. Power Electron. – 2014. – Vol. 29, No. 11. – P. 5835–5845.
26. Biela J. Passive and active hybrid integrated EMI filters / J. Biela, A. Wirthmueller, R. Waespe et al. // IEEE Trans. Power Electron. – 2009. – Vol. 24, No. 5. – P. 1340–1349.
27. Jong E.D. Improving the thermal management of ACDC converters using integration technologies / E.D. Jong, J. Ferreira, P. Bauer // Proc. IEEE Industry Applications Conf. – Seattle, WA, USA. – October 2004. – Vol. 4. – P. 2315–2322.
28. Brink E.A. Analytical approach for determining the frequency-dependent characteristics of multipath conductive structures / E.A. Brink, I.W. Hofsjager // IEEE Trans. Power Electron. – 2014. – Vol. 29, No. 11. – P. 5835–5845.
29. Racasan A. Advances on parasitic capacitance reduction of EMI filters / A. Racasan, C. Munteanu, V. Topa et al. // Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series. – 2010. – No. 34.

---

**Собко Александр Александрович**  
Аспирант каф. ТУ, м.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС» ТУСУР  
Эл. почта: alexfreetibet@gmail.com

УДК 004.414

**А.А. Собко, А.В. Осинцев**

## Лабораторный макет датчика тока и напряжения на отечественном микроконтроллере K1986BE92Q1

Предложен лабораторный макет датчика для измерения тока и напряжения в силовой шине электропитания на основе отечественного микроконтроллера серии 1986BE9х. Представлена разработанная схема лабораторного макета датчика тока и напряжения, предназначенного для тестирования алгоритмов и отладки программного кода микроконтроллера, и может быть применима к силовой шине электропитания постоянного тока. Разработанный код выполняет обработку сигналов тока и напряжения двумя независимыми аналого-цифровыми преобразователями микроконтроллера. Вычисленные показания тока и напряжения передаются по интерфейсу универсального асинхронного приемопередатчика на персональный компьютер, либо на другое вычислительное устройство посредством прямого доступа к памяти, что снижает вычислительные затраты микроконтроллера.

**Ключевые слова:** датчик тока, датчик напряжения, макет, программное обеспечение, АЦП, микроконтроллер.