

## Устойчивость и электромагнитная совместимость устройств и систем электропитания

В.Ф. Дмитриков<sup>1</sup>, Д.В. Шушпанов<sup>1</sup>, Г.Н. Капралов<sup>2</sup>, А.Ю. Петроченко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
191186, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург  
наб. р. Мойки, 61

<sup>2</sup> АО «Специальное конструкторско-технологическое бюро по релейной технике»  
173021, Российская Федерация, г. Великий Новгород  
ул. Нехинская, 55

<sup>3</sup> АО «Концерн «НПО «Аврора»  
194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург  
ул. Карбышева, 15

Рассмотрены основные вопросы, возникающие при проектировании и разработке устройств и систем электропитания – электромагнитная совместимость отдельных узлов в системе электропитания, их устойчивость, а также устойчивость всей системы электропитания.

*Ключевые слова:* импульсный преобразователь напряжения, распределенная система электропитания, устойчивость, фильтр, отрицательная обратная связь.

Современная концепция построения систем электропитания промышленного и специального назначения основана на унификации энергетически эффективных импульсных источников электропитания различных видов энергии, различных уровней мощности, с различными входными и выходными напряжениями и т. д. в модульном исполнении.

Наличие большого количества, зачастую противоречивых, требований к системам вторичного электропитания (СВЭП), вынуждает применять в ее составе значительный набор специализированных устройств, разрешающих эти противоречия: преобразователей напряжения (DC/DC) с многоконтурными линейными и нелинейными ОС, являющихся сложными дискретно-нелинейными устройствами; пассивных и активных сетевых защитных устройств; пассивных и активных фильтров радиопомех; выпрямителей с активным корректором коэффициента мощности; устройств управления, контроля, связи, диагностики, требующих, к тому же, определенного резервирования.

На рис. 1 приведена схема транзисторного преобразователя переменного напряжения в постоянное напряжение – **АС/DC преобразователя**. Она содержит: устройство ограничения импульсных коммутационных помех, сетевой

фильтр радиопомех (ФРП), сетевой выпрямитель (СВ), активный корректор коэффициента мощности (ККМ), выполненный по схеме повышающего преобразователя, высокочастотный трансформаторный преобразователь постоянного напряжения (ПН), выходной выпрямитель и силовой сглаживающий фильтр (СФ).

При разработке даже отдельных модулей, и особенно агрегатированных (составных, сложных) приборов и распределенных систем электропитания (РСП) одной из наиболее важных и сложных проблем, которые необходимо решить – это проблемы их устойчивости.

Непрерывное расширение областей применения импульсных преобразователей напряжения (ИПН) сопровождается возрастанием требований к их характеристикам и параметрам, появлению ряда новых структур, организации систем электропитания (распределенные системы с двух- и трехкратным преобразованием энергии) в различных областях техники (телекоммуникационной, радиолокационной, гидроакустической, офисных помещениях и т. д.). Это ставит перед теорией новые все усложняющие задачи, выявляя недостаточную проработку ряда важных теоретических проблем. К ним в первую очередь относятся вопросы устойчивости и электромагнитной совместимости, анализа

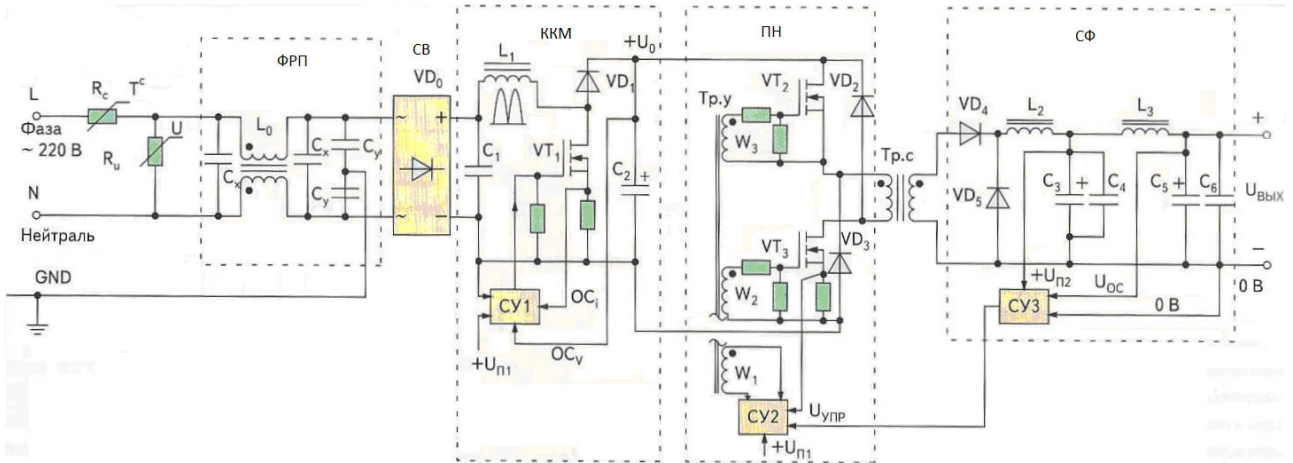
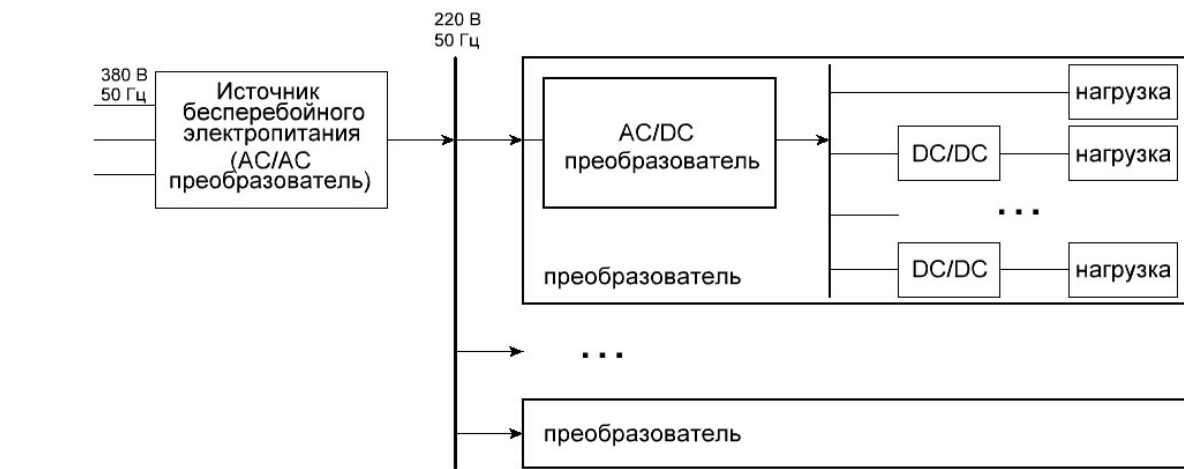
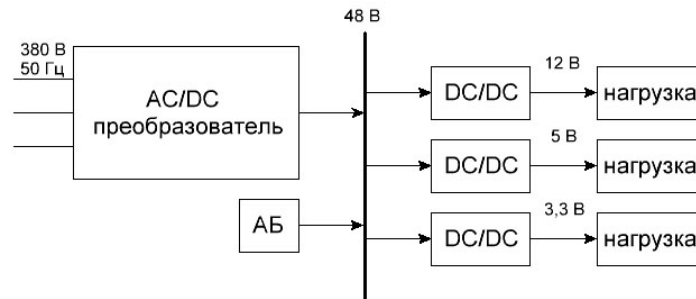


Рис. 1. Схема транзисторного AC/DC преобразователя



а)



б)

Рис. 2. Распределенная система электропитания: а) с шиной переменного тока, б) с шиной постоянного тока

нелинейных колебаний, возникающих при нарушении устойчивости.

Решение проблемы устойчивости современных импульсных источников вторичного электропитания (ИВЭП) усложняется тем, что они имеют многоконтурные линейные и нелинейные отрицательные обратные связи (ООС) и являются дискретно-нелинейными замкнутыми системами, сложность исследования их общеизвестна и теория их анализа и синтеза развивается.

Одна из основных причин возбуждения модулей, агрегируемых (составных) приборов, распределенных систем электропитания (РСП)

заключается в том, что все ИП со стабилизированным выходным напряжением, т. е. с ООС имеют комплексные входные и выходные сопротивления с отрицательной резистивной составляющей дифференциального входного сопротивления.

При интегрировании системы, содержащей входной реактивный LC-фильтр и ИПН, системы, осуществляющие двух- или трехкратное преобразование энергии (когда импульсный преобразователь работает на импульсный преобразователь) и т. п., при использовании отдельных модулей, устойчиво работающих на резистив-

ную нагрузку, очень часто происходит возбуждение и даже выход из строя всей системы.

На рис. 2 приведены структурные схемы распределенных систем электропитания с шинами переменного тока 220 В, 50 Гц и постоянного 28 В тока (трехкратное преобразование энергии) для особо ответственных потребителей (рис. 2, а) и РСП с шиной постоянного тока (двухкратное преобразование энергии) и поддержкой электропитания с помощью аккумуляторной батареи (АБ) (рис. 2, б). До шины имеем централизованное питание, а после шины – питание распределенной в пространстве функциональной аппаратуры – децентрализованное.

Рассчитывая передаточную характеристику двух каскадно-соединенных четырехполюсников через матрицы А-параметров, можно показать, что передаточная функция  $H(j\omega)$  двух четырехполюсников зависит не только от передаточных функций каждого четырехполюсника, но и отношения комплексного выходного сопротивления первого четырехполюсника  $Z_{ВЫХ}^{(1)}(j\omega)$  к входному комплексному сопротивлению второго четырехполюсника  $Z_{ВХ}^{(2)}(j\omega)$  [1–16]:

$$H(j\omega) = \frac{H_1(j\omega)|_{XX} \cdot H_2(j\omega)}{1 + Z_{ВЫХ}^{(1)}(j\omega)/Z_{ВХ}^{(2)}(j\omega)}. \quad (1)$$

Если на некоторой частоте, при определенных параметрах четырехполюсников будет выполняться соотношение  $Z_{ВЫХ}^{(1)}(j\omega)/Z_{ВХ}^{(2)}(j\omega) = -1$ , то в данной системе согласно (1) возникает автоколебательный режим, т. е. система будет не работоспособной или даже может выйти из строя.

Синтез систем управления ИПН осуществляется при заданных схеме и параметрах силовой части, являющейся **объектом управления**. В связи с этим анализ и расчет силовой части ИПН является важным этапом, предшествующим синтезу системы управления и оказывающим существенное влияние как на этап синтеза системы управления, так и на характеристики ИПН с замкнутой системой управления.

Таким образом, вместе с анализом и синтезом устройств управления, обеспечивающих устойчивость отдельного модуля ИПН, необходимо решить более сложную проблему – проблему устойчивости агрегатированного (сложного, составного) прибора, устойчивость распределенной системы электропитания.

Следующая не менее важная и не решенная проблема заключается в том, что отечественные разработчики модулей ИПН осуществляют

анализ и синтез устройств и систем управления с учетом, что ИПН работает на резистивную нагрузку. Однако в реальности нагрузка всегда комплексная: линейная активно-емкостная или активно-индуктивная или сложная нелинейная комплексная нагрузка (другой преобразователь, емкостный выпрямитель и т. д.).

Таким образом, при проектировании и синтезе устойчивых отдельных модулей ИПН и агрегатированных приборов, распределенных систем электропитания, осуществляющих двух- или трехкратное преобразование энергии, необходимо согласно (1) обеспечивать, во-первых, устойчивость отдельных модулей с достаточным запасом устойчивости по амплитуде и фазе, во-вторых, проектировать агрегатированный прибор или распределенную систему таким образом, чтобы не выполнялось условие  $Z_{ВЫХ}^{(1)}(j\omega)/Z_{ВХ}^{(2)}(j\omega) = -1$ .

Современные радиоэлектронные, радиотехнические и связанные системы и устройства предъявляют все более жесткие требования к статическим (стабильность выходного напряжения, величина высокочастотных и низкочастотных пульсаций), динамическим (величина перерегулирования, время установления выходного напряжения при включении или отключении источника питания, скачкообразном изменении входного напряжения или нагрузки) и массогабаритным характеристикам вторичных источников электропитания.

Для стабилизации выходных характеристик и улучшения динамических характеристик обычно используется обратная связь по выходному напряжению или току, а для обеспечения или повышения запаса устойчивости используются корректирующие звенья в цепях обратной связи или контура обратной связи по различным переменным состояния [6–8; 17–22].

Основная проблема, которую необходимо решить в импульсных источниках питания с ООС по выходному напряжению, заключается в обеспечении достаточно большой глубины ООС, а, следовательно, коэффициента стабилизации выходного напряжения или тока и, одновременно, обеспечении достаточного запаса устойчивости по фазе и амплитуде и хорошего качества динамических характеристик.

Как отмечалось выше, импульсные преобразователи являются дискретно нелинейными замкнутыми системами. Для исследования устойчивости работы данных устройств исполь-

зается метод усреднения и линеаризации дискретно нелинейных систем [5–7; 19–22]. Этот метод позволяет перейти от дискретно нелинейной системы к непрерывной линейной, получить частотную передаточную функцию петлевого усиления разомкнутой петли ООС и с использованием частотных критериев Боде определить устойчивость системы, полосу подавления низкочастотных пульсаций и коэффициент стабилизации выходных параметров [6–8; 17–22]. Основное достоинство метода усреднения и линеаризации – возможность определения частотной передаточной функции разомкнутой петли ООС в аналитическом виде, а, следовательно, возможность реализации синтеза цепи ООС по требуемым амплитудным и фазочастотным характеристикам петлевого усиления ИПН. Передаточная функция замкнутой или разомкнутой системы импульсных преобразователей напряжения зависит от передаточной функции ее непрерывной части (сглаживающих фильтров), а также типа и числа контуров обратной связи и корректирующих звеньев в цепи обратной связи.

Метод усреднения и линеаризации является приближенным методом. При этом погрешность возникает как при усреднении, т. е. замене уравнений, описывающих переменные состояния системы на различных интервалах работы ИПН одним непрерывным дифференциальным уравнением, так и при линеаризации полученного непрерывного нелинейного уравнения на этапе усреднения. Погрешность метода усреднения и линеаризации в указанных работах не рассматривалась.

Точность метода усреднения и линеаризации зависит от отношения частоты коммутации силовых транзисторов к частоте единичного петлевого усиления; величины пульсаций; коэффициента заполнения (отношения длительности импульса тока через транзистор преобразователя к периоду коммутации); величины возмущений (величины скачка входного напряжения и сопротивления нагрузки) и т. д. [23].

Погрешность расчета АЧХ и ФЧХ петлевого усиления ИПН зависит от многих параметров: отношения тактовой частоты переключения транзисторов к частоте единичного петлевого усиления  $f_T / f_0$ , коэффициента стабилизации выходного напряжения  $K_{СТ}$ , коэффициента пульсаций выходного напряжения с частотой коммутации транзисторов, коэффициента заполнения импульсов на входе силового сгла-

живающего фильтра (отношение длительности открытого состояния транзистора к длительности периода  $D = t_M / T$ ) и частоты. Например, на полутактовой частоте  $f_T / 2$ , на которой, как правило, начинается возбуждение ИПН, погрешность расчета АЧХ и ФЧХ петлевого усиления линеаризованной модели ИПН при работе ИПН на однозвенный сглаживающий фильтр с коэффициентом подавления пульсаций 44 дБ и одноконтурной ООС по выходному напряжению, коэффициентом стабилизации  $K_{СТ} = 25$  дБ при работе на резистивную нагрузку и соотношением  $f_0 / f_T = 0,15$  соответственно равны 5 дБ и  $20^\circ$  [23]. Величина погрешностей расчета АЧХ и ФЧХ растет с ростом отношения  $f_0 / f_T$ , коэффициента стабилизации и коэффициента пульсаций.

Для данного ИПН при коэффициенте стабилизации  $K_{СТ} = 44$  дБ расчеты, полученные с использованием метода усреднения и линеаризации, определяют устойчивый режим работы с запасом устойчивости по фазе порядка  $30^\circ$ , тогда как расчет временных характеристик (выходного напряжения и тока дросселя) ИПН численным методом и физический макет показывают неустойчивый режим работы [23].

Для улучшения качества динамических процессов при различных возмущающих воздействиях, т. е. обеспечения малой величины перерегулирования (для современных цифровых систем связи величина перерегулирования ограничивается жесткими нормами:  $G_{ДИН} = \pm 2\%$ ), малой длительности переходных процессов (до десятков микросекунд), снижения низкочастотных пульсаций (гармоник выпрямленного сетевого напряжения) до десятков – единиц милливольт, стабильности выходных характеристик до единиц – долей процента при обеспечении устойчивой работы ИПН, необходимо исследовать и сравнить устойчивость работы и динамические характеристики ИПН с различными контурами обратной связи и различными корректирующими звеньями, различными типами сглаживающих фильтров и различным их ослаблением на тактовой частоте, при различной глубине ООС, различных сопротивлений потерь в конденсаторах и дросселях сглаживающего фильтра при изменении параметров и характера нагрузки.

Если расчет энергетических параметров ИПН таких как средние и максимальные значения токов и напряжений транзисторов, диодов, дрос-

селя сглаживающего фильтра, регулировочная характеристика и другие энергетические характеристики ИПН проведены в литературе достаточно корректно, то расчет важнейшего параметра ИПН как пульсации выходного напряжения с тактовой частотой проводится только по первой гармонике прямоугольных импульсов на входе СФ. Если расчет пульсаций по первой гармонике напряжения прямоугольных импульсов еще возможен с некоторой погрешностью в реактивных LC-фильтрах без резистивных потерь в конденсаторах и дросселях фильтра (что на практике невозможно), то при учете реальных резистивных потерь в конденсаторе сглаживающего фильтра и форма, и величина пульсаций резко отличаются от пульсаций в СФ без потерь [4–8]. Поэтому точный расчет величины и формы пульсаций с учетом резистивных потерь в конденсаторе СФ и с учетом всех гармоник прямоугольных импульсов на входе СФ просто необходим.

В настоящее время в различных областях техники широко используются агрегатированные (составные, сложные) и распределенные системы электропитания по постоянному току. В качестве подсистем используются энергетически высокоэффективные бестрансформаторные высокочастотные импульсные источники питания различных типов (понижающие, повышающие, инвертирующие; однотактные и двухтактные, многофазные и т. д.).

Сложность анализа и проектирования распределенной системы электропитания, использующей в качестве подсистемы высокочастотные импульсные источники как целой системы, чрезвычайно велика. Поэтому в настоящее время существует отечественная практика, когда каждая подсистема разрабатывается индивидуально без учета взаимного влияния подсистем друг на друга, а затем они интегрируются, чтобы сформировать полную систему электропитания.

Одной из наиболее важных задач, возникающих при интеграции отдельных блоков в систему, является обеспечение устойчивости распределенной системы электропитания, а также преобразователей с входными фильтрами; преобразователя, работающего на преобразователя; параллельно работающих преобразователей, которая нарушается из-за взаимодействия подсистем. Подсистема, работающая в автономном режиме с большим запасом устойчивости по

фазе и амплитуде и обладающая хорошими статическими и динамическими свойствами, может перейти в режим автоколебаний, и в ней могут существенно ухудшиться статические и динамические характеристики после интеграции подсистем в единую систему электропитания [5–16]. Эти обстоятельства приводят к необходимости исследовать причины, влияющие на устойчивость работы распределенной системы электропитания, ухудшение ее характеристик и разработать методику проектирования распределенной системы электропитания с учетом снижения или устранения вредного влияния различных подсистем друг на друга.

Рассмотрим пример неустойчивости системы «фильтр электромагнитных помех – импульсный преобразователь напряжения». На рис. 3 приведены частотные зависимости выходного сопротивления сетевого фильтра радиопомех и входного сопротивления ИПН, показывающее выполнение условия  $Z_{\text{ВЫХ}}^{(1)}(j\omega)/Z_{\text{ВХ}}^{(2)}(j\omega) = -1$ . Временные диаграммы (выходное напряжение фильтра и выходное напряжение ИПН) показывают возникновения автоколебаний (рис. 4). Напряжение пульсаций выходного напряжения ИПН равно одному вольту. Это превышает в 16 раз напряжение пульсаций в номинальном режиме (60 мВ).

Основные вопросы, которые надо решить при проектировании входного фильтра радиопомех, чтобы система электропитания, в которую входит этот фильтр, была устойчива и соответствовала нормативным документам по технике безопасности:

- обеспечение требуемого подавления ФРП в широкой полосе частот (9 кГц – 100 МГц);
- **ограничение максимального значения выходного сопротивления ФРП ниже входного резистивного сопротивления ИПН;**
- **обеспечение тока утечки ФРП для сети переменного тока не более 6 мА.**

К сожалению, многие разработчики систем электропитания опускают два последних пункта из рассмотрения при проектировании всей системы электропитания и только на этапе отладки решают эти вопросы, что резко увеличивает проектирование и разработку системы электропитания, а также ухудшает технические характеристики данной системы электропитания.

В случае покупки ФРП необходимо проверить удовлетворяет ли он требованиям по ослаблению электромагнитных помех от преобразователя в

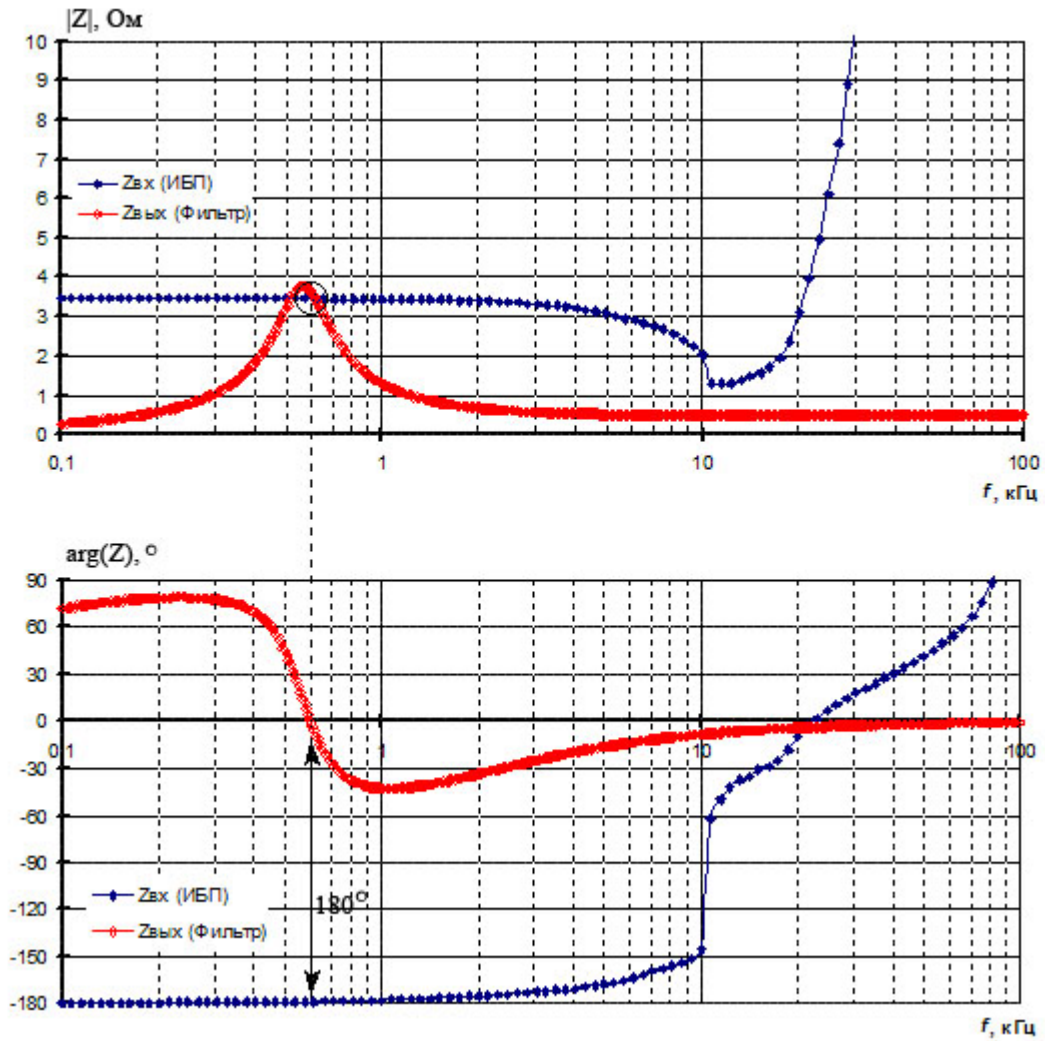


Рис. 3. Выходное сопротивление сетевого фильтра и входное сопротивления ИПН (автоколебательный режим в системе «входной фильтр-преобразователь»)

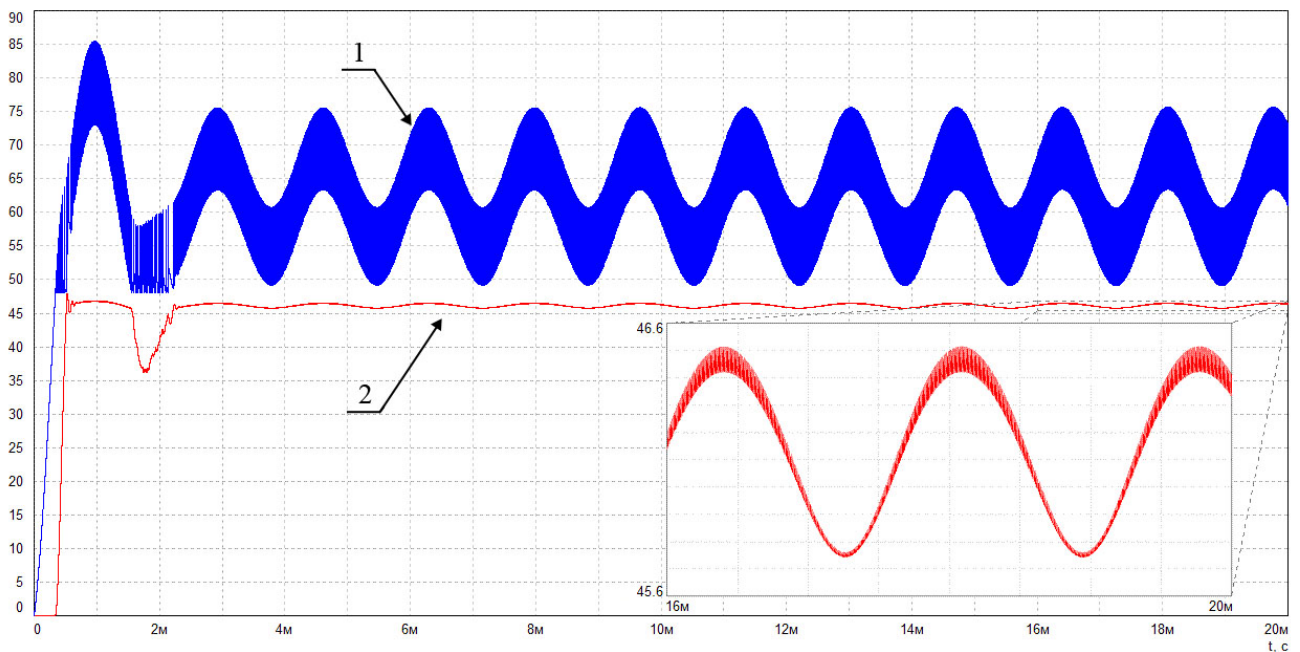


Рис. 4. Временные диаграммы (автоколебательный режим): 1 – напряжение на выходе фильтра; 2 – напряжение на выходе преобразователя

сеть в заданной полосе частот, имеет ли он требуемое выходное сопротивление, обеспечивающее устойчивую работу системы «ФРП – ИПН» на конкретный преобразователь и обеспечивает ли токи утечки, соответствующие нормативным документам для конкретной аппаратуры.

Необходимо учитывать особенность анализа устойчивости и причины возникновения автоколебательных режимов в распределенных системах электропитания, обусловленные возникновением внутренней отрицательной обратной связи в каскадно-соединенных преобразователях, и определяемой отношением комплексного выходного сопротивления ведущего преобразователя к комплексному входному сопротивлению ведомого преобразователя.

Критерий устойчивости (1) позволяет определять устойчивость распределенных систем электропитания по амплитуде и фазе, если между преобразователями (нелинейными импульсными устройствами) будет стоять линейное звено (фильтр). Это, как правило, всегда выполняется на практике. Однако данный критерий не всегда позволяет определить возможную частоту автоколебаний из-за режима разрывного тока дросселя СФ, названного режимом «большого» сигнала, когда частота автоколебаний может уменьшаться относительно частоты определяемой критерием (1).

В случае двух каскадно-соединенных преобразователей без наличия дополнительного фильтра между ними линейный критерий (1) не работает из-за нелинейности двух взаимосвязанных нелинейных устройств. В такой системе следует определять условия возбуждения системы, используя другие (нелинейные) критерии.

### Список литературы

1. Ridley R.B., Cho B.H., Lee F.C. Analysis and interpretation of loop gains of multiloop - controlled switching regulators // IEEE Trans. Power Electron. 1998. Vol. 3. № 4. P. 271–280.
2. Cho B.H., Lee F.C. Measurement of loop gain with the digital modulator // IEEE Trans. Power Electron. 1986. Vol. PE1. № 1. P. 55–62.
3. Дмитриков В.Ф., Самылин И.Н. Влияние комплексной нагрузки на устойчивость работы и динамические характеристики импульсных источников питания // Практическая силовая электроника. 2006. Вып. 21. С. 15–18.
4. Дмитриков В.Ф., Самылин И.Н. Устойчивость импульсных преобразователей в распределенных системах электропитания // Электронные компоненты. 2006. Вып. 4. С. 12–15.
5. Шушпанов Д.В. Высокоэффективные импульсные преобразователи напряжения с ШИМ и распределенные системы электропитания на их основе. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность: 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». СПб, 2005.
6. Дмитриков В.Ф., Сергеев В.В., Самылин И.Н. Повышение эффективности преобразовательных и радиотехнических устройств. М.: Радио и связь, 2005. 424 с.
7. Самылин И.Н. Развитие теории, принципов построения транзисторных преобразователей напряжения и распределенных систем электропитания на их основе. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Специальность: 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». СПб, 2006. 434 с.
8. Смирнов В.С. Эквивалентные частотные характеристики транзисторных ключевых устройств с отрицательной обратной связью. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность: 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». СПб, 2007. 261 с.
9. Дмитриков В.Ф., Коржавин О.А., Шушпанов Д.В. Устойчивость распределенной системы электропитания с учетом промежуточных фильтров // Практическая силовая электроника. 2010. № 4. Вып. 40. С. 28–35.
10. Middlebrook R.D. Input filter considerations in design and application of switching regulators // IEEE Power Electronics Specialists Conference. 1977. P. 36 – 57.
11. Mitchell D.M. Power line filter design considerations for dc-dc converters // IEEE Industry Applications Magazine. November/December. 1999. P. 16–26.
12. Middlebrook R.D. Design techniques for preventing input-filter oscillations in switched-mode regulators // Proc. Fifth National Solid-State Power Conversion Conference. 1978. P. A.3.1–A.3.16.
13. Lee F.C., Yu Y. Input-Filter Design for Switching Regulators // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1979. Vol. AES-15. № 5. P. 627–634.
14. Wildrick C.M. Stability of distributed power supply systems. Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, 1993. 90 p.
15. Cho B.H., Choi B. Analysis and design of multi-stage distributed power supply systems // INTELEC Conf. Proc. 1991.
16. Schulz S.E. System interactions and design considerations for distributed power systems. Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1991.
17. Беловицкий О.И., Самылин И.Н., Шушпанов Д.В. Исследование динамических и статических характеристик импульсного преобразователя повышающего типа с корректирующими звеньями // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2004. № 2. С. 42–52.

18. Дмитриков В.Ф., Беловицкий О.И., Самылин И.Н. Исследование статических и динамических характеристик импульсных преобразователей понижающего типа при использовании фильтров с различными характеристиками // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2004. № 3. С. 39–49.
19. Коржавин О.А. Динамические характеристики импульсных полупроводниковых преобразователей и стабилизаторов постоянного напряжения. М.: Радио и связь, 1997. 300 с.
20. Самылин И.Н. Исследование и разработка импульсных преобразователей напряжения с широтным регулированием с улучшенными динамическими и массогабаритными характеристиками. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность: 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». СПбГУТ, им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2001. 252 с.
21. Исследование динамических характеристик импульсного преобразователя напряжения с различными фильтрами и контурами обратной связи / В.Ф. Дмитриков [и др.] // Труды учебных заведений связи СПбГУТ. 2002. № 168. С. 309–316.
22. Исследование устойчивости импульсных преобразователей с ШИМ / В.Ф. Дмитриков [и др.] // Межвузовский сборник научных трудов СПбГТУРП. 2002. С. 237–249.
23. Самылин И.Н., Шушпанов Д.В., Сайко Н.Ю. Оценка погрешности метода усреднения и линеаризации для импульсного преобразователя напряжения понижающего типа с обратной связью по выходному напряжению // Труды учебных заведений связи СПбГУТ. 2005. № 173. С. 199–211.

## The stability and electromagnetic compatibility of power supply modules and systems

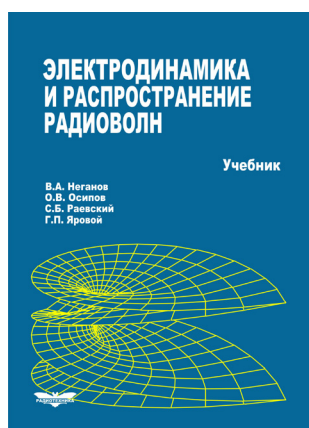
*V.F. Dmitrikov, D.V. Shushpanov G.N. Kapralov, A.Y. Petrochenko*

The main questions for designing the power supply modules and systems are considered. They are the electromagnetic compatibility of power supply modules, the stability of power supply modules and the stability of whole power supply system.

*Keywords:* pulse voltage converter, distributed power system, stability, filter, negative feedback.

### Неганов, В.А.

**Электродинамика и распространение радиоволн:** учебник / В.А. Неганов [и др.]; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – Изд. 4-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2009. – 744 с.



ISBN 978-5-88070-154-4

УДК 537.87(075.3)  
ББК 22.3  
Н 41

Книга написана активно работающими в области электродинамики учеными. Излагаются теория электромагнитного поля с акцентом на радиотехническую электродинамику и анализ волновых процессов; рассматриваются отражение и преломление волн, излучение и дифракция; описываются основные закономерности распространения электромагнитных волн в различных безграничных средах (изотропных, анизотропных, диспергирующих, неоднородных), в направляющих и резонансных структурах, в природных условиях. Обсуждаются методы математического моделирования в электродинамике, опирающегося на применение ЭВМ.

Отличительной особенностью книги является обсуждение современных проблем электродинамики: расчет электромагнитных волн в ближних зонах излучающих структур (самосогласованный метод расчета), комплексных волн в волноведущих структурах и др.

Предназначается для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей вузов, а также инженеров-радиотехников и радиофизиков.