

## Основные научные проблемы построения отечественных агрегатированных (сложных) приборов и распределенных систем вторичного электропитания и причины отставания их характеристик от современных зарубежных аналогов

В.Ф. Дмитриков, Д.В. Шушпанов

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

Рассмотрены основные проблемы построения отечественных систем вторичного электропитания. Показано, что основная проблема при построении систем электропитания с двух- и трехкратным преобразованием электроэнергии – это проблема устойчивости. Показано, что отдельные подсистемы с отрицательной обратной связью, работающие в автономном режиме с большими запасами устойчивости по амплитуде и фазе, будучи интегрированы в единую систему из-за взаимного влияния друг на друга могут возбуждаться. Показана важность определения частотных характеристик преобразователей напряжения. Показаны причины отставания характеристик систем вторичного электропитания от современных зарубежных аналогов.

*Ключевые слова:* ИПН, распределенная система электропитания, устойчивость, отрицательные обратные связи.

---

«Надо вести анализ полных радиоэлектронных систем и на основе результатов этого анализа формировать требования к конкретным устройствам»  
Ю. И. Конев

Сегодня ни одна из окружающих нас радиоэлектронных систем в промышленном оборудовании, вооружении и военной технике (ВиВТ) не может существовать без электропитания. Отказ системы электропитания приводит к прекращению работы питаемого оборудования. Поэтому ни одна система не может быть надежнее своей системы электропитания. То есть электропитание является условием и средой функционирования всех технических радиоэлектронных средств и систем.

Качество электрической энергии питания и надежность работы источников электропитания (ИП) определяют качественные, массогабаритные характеристики и надежность работы аппаратуры. ИП занимают до 60–80 % габаритов радиоэлектронных систем (РЭС) и половина отказов в работе РЭС происходит по вине ИП.

Непрерывное расширение областей применения систем вторичного электропитания (СВЭП), возрастание требований к качеству преобразуемой ими энергии, появлению новых агрегатированных (составных, сложных) приборов, новых структур электропитания, все более широкая

организация распределенных систем электропитания с двух или трехкратным преобразованием энергии практически во всех областях техники (телекоммуникационной, связной, радиолокационной, гидроакустической, офисной, системах управления и т. д.) ставит перед теорией и практикой создания СВЭП новые все усложняющиеся проблемы, выявляя их недостаточную проработку. К ним в первую очередь относятся вопросы устойчивости и электромагнитной совместимости (ЭМС).

Постоянный и быстрый рост энерговооруженности РЭС промышленного применения и ВиВТ, наличие большого количества противоречивых требований к СВЭП (например, постоянное требование снижения массогабаритных параметров и улучшения ЭМС при одновременном увеличении выходной мощности) вынуждает применять в составе СВЭП большой набор электронных устройств, разрешающих эти противоречия, но и резко усложняющие СВЭП. На рис. 1 приведена функциональная схема импульсного источника питания, преобразующего переменное напряжение в постоянное (АС/DC преобразователь). Современный АС/DC преобразователь содержит устройство защиты от импульсно-коммутационных помех, сетевой фильтр радио-

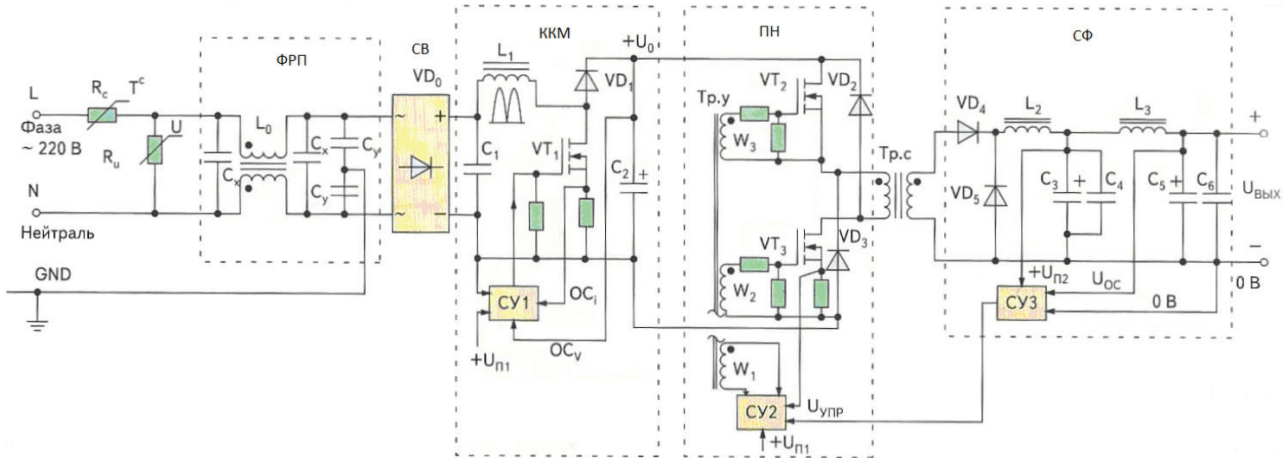
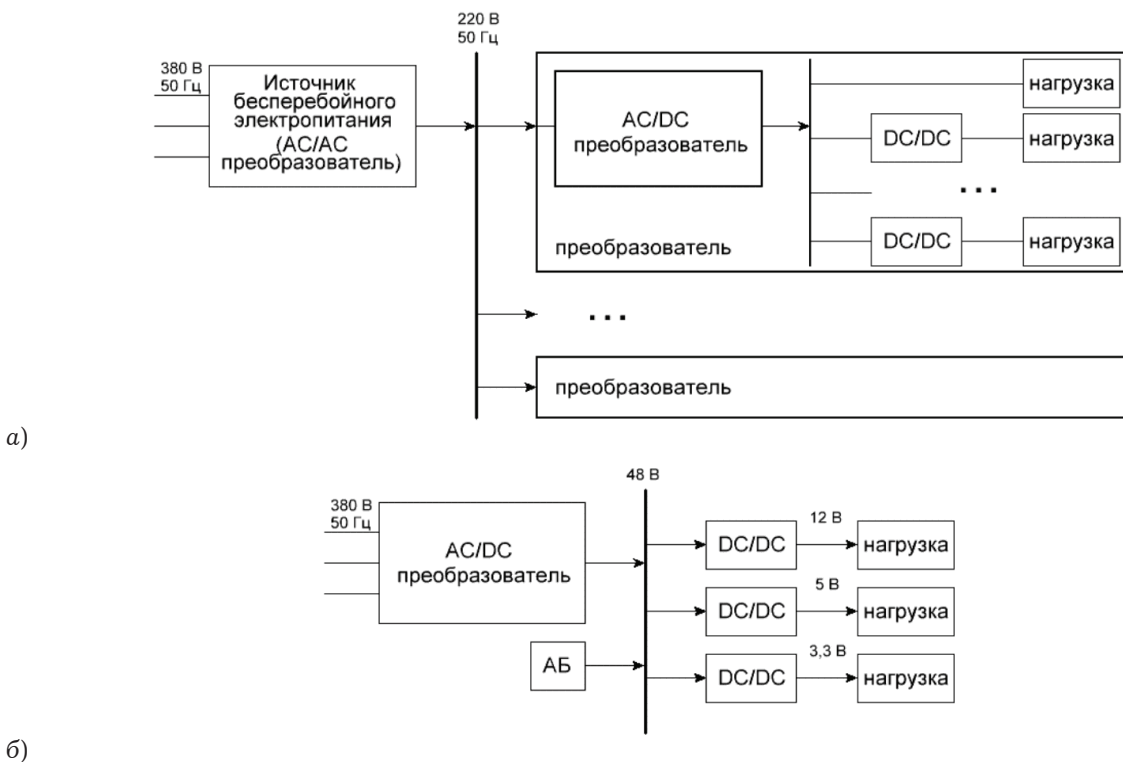


Рис. 1. Схема транзисторного AC/DC преобразователя



а)

б)

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

помех (ФРП), устройство плавного запуска, сетевой низкочастотный выпрямитель (СВ и), корректор коэффициента мощности (ККМ) с накопительным конденсатором  $C_2$ , высокочастотный преобразователь напряжения (ПН), трансформаторно-выпрямительное устройство, силовой сглаживающий фильтр (СФ).

При разработке даже отдельных транзисторных преобразователей электроэнергии (модулей) и особенно агрегатированных (составных, сложных) приборов и распределенных систем электропитания одной из наиболее важных и сложных проблем, которые необходимо решить – это проблемы их устойчивости. Решение проблемы устойчивости современных им-

пульсных ИП усложняется тем, что они имеют многоконтурные отрицательные обратные связи (ООС) и являются дискретно-нелинейными замкнутыми системами, сложность исследования их общеизвестна и теория их анализа и синтеза развивается. В настоящее время они являются наиболее сложными устройствами в теории автоматического управления.

Одна из основных причин возбуждения модулей, агрегатированных (составных) приборов, распределенных систем электропитания заключается в том, что все ИП со стабилизированным выходным напряжением, т. е. с ООС имеют комплексные входные и выходные сопротивления с отрицательной резистивной составляющей диф-

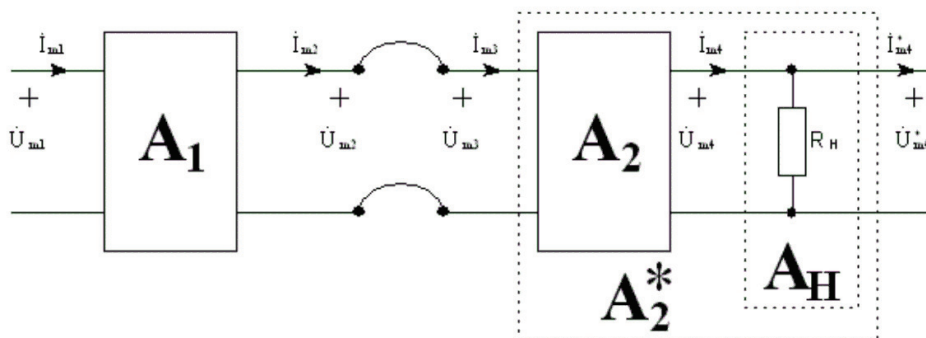


Рис. 3. Каскадное соединение четырехполюсников

ференциального входного сопротивления. При интегрировании системы из отдельных модулей, устойчиво работающих на резистивную нагрузку, очень часто приходит возбуждение и выход из строя всей системы.

Как отмечалось выше, практически во всех отраслях промышленности и техники, ВИВТ находят широкое применение распределенные системы электропитания (РСП) или агрегатированные приборы, в которых используется стабилизированные «шины» бесперебойного электропитания переменного или постоянного тока, запитываемые от первичного источника с помощью мощного централизованного ИП AC/DC или DC/DC. От «шины» бесперебойного электропитания, требуемой величиной и качеством выходного напряжения, в которой отсутствуют импульсно-коммутационные помехи, существующие в первичной сети, запитываются распределенные в пространстве функциональные РЭС с помощью распределенных ИП (рис. 2). Таким образом в РСП или агрегатированных приборах, осуществляющих двух- или трехкратное преобразование электрической энергии, производится каскадное соединение ИП (рис. 3). Рассчитывая передаточную характеристику каскадного соединения четырехполюсников с помощью матриц А-параметров, можно показать, что передаточная функция двух каскадно соединенных четырехполюсников  $H(j\omega)$  зависит не только от передаточной характеристики каждого четырехполюсника  $H_1(j\omega)$  и  $H_2(j\omega)$ , но и от выходного комплексного сопротивления первого четырехполюсника  $Z_{ВЫХ}^{(1)}(j\omega)$  и входного комплексного сопротивления второго четырехполюсника  $Z_{ВХ}^{(2)}(j\omega)$  [1–17]:

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

Входные и выходные сопротивления ИВЭП зависят от сопротивления нагрузки, напряжения

питания, параметров силового сглаживающего фильтра, частоты и т. д. Вещественная часть комплексного входного сопротивления ИВЭП с ООС отрицательна. Поэтому, если при некоторых параметрах каскадно-соединенных ИВЭП выполняется равенство  $Z_{ВЫХ}^{(1)}(j\omega)/Z_{ВХ}^{(2)}(j\omega) = -1$ , то в системе возникает автоколебательный режим и она выйдет из строя. Поэтому РСП, агрегатированные приборы вторичного электропитания являются потенциально неустойчивыми. В РСП, состоящей из абсолютно устойчивых модулей с запасами устойчивости по амплитуде и фазе каждого модуля, часто происходит возбуждение и выход из строя всей системы из-за изменения  $Z_{ВЫХ}^{(1)}(j\omega)$  и  $Z_{ВХ}^{(2)}(j\omega)$  во время ее эксплуатации и изменения напряжения питания, параметров нагрузки, импульсно-коммутационных помех на входе РСП и т. д.

Таким образом, при проектировании устойчивых агрегатированных приборов, РСП необходимо, во-первых, проектировать отдельные модули ИВЭП при работе на реальную линейную или нелинейную комплексную нагрузку, статическую или динамическую (изменяющуюся во времени) с достаточным запасом устойчивости по амплитуде и фазе, во-вторых, проектировать агрегатированный прибор или РСП, таким образом, чтобы не выполнялось условие (1) во время эксплуатации системы при работе на реальные нагрузки, которые представляют собой РЭС.

На сегодняшний день существует неправильная отечественная практика, когда производитель СВЭП проектирует их на резистивную нагрузку. Он, как правило, не знает кому продает свои источники и на какую нагрузку они должны работать.

Также на сегодняшний день ни одна из отечественных фирм производителей СВЭП не приводит в ТУ комплексные входные и выходные сопротивления модулей, запасы устойчивости по

амплитуде и фазе даже для ИВЭП с приемкой «5». Эти характеристики приводятся зарубежными фирмами, производящими ИВЭП «Military», а измерительное оборудование производится с 1985 г. различными зарубежными фирмами [17]: Venable Instruments (США), NF Corporation (Япония), Newtons4th Ltd (Великобритания), Powertek (Сингапур), Solartron Analytical (Великобритания), AP Instruments (США), OMI-CRON Lab (офисы в более чем 50 странах).

Для создания отечественных систем вторичного электропитания (агрегатированных приборов, распределенных систем электропитания) для радиоэлектронных систем ВиВТ (АФАР радиолокационных станций, насчитывающих тысячи и десятки тысяч модулей источников питания; радиоэлектронных систем надводных кораблей и подводных лодок, насчитывающих тысячи источников питания; авиационно-космических комплексов; систем связи и телекоммуникаций и т. д.) на уровне систем электропитания мировых лидеров (Vicor, Interpoint и др.) необходимо выполнить следующие задачи:

- разработать теорию системного анализа устойчивых СВЭП с учетом структурно-параметрических схем замещения первичных источников электропитания и реальных комплексных нагрузок (линейных или нелинейных, статических или динамических);

- разработать технологии преобразования энергии, обеспечивающих максимум КПД в соответствии с современными международными стандартами для всего диапазона нагрузок;

- разработать ГОСТы для современных СВЭП с указанием необходимых запасов устойчивости по амплитуде и фазе при работе на различные комплексные нагрузки (линейные или нелинейные, статические или динамические);

- разработать парк измерительных приборов для измерения частотных характеристик петлевого усиления, входных и выходных сопротивлений СВЭП.

Поскольку решение данных фундаментальных проблем невозможно осуществить существующим отечественным фирмам, то необходимо создание головной государственной организации по разработкам систем вторичного электропитания на базе предприятия ГК «Ростех», а также привлечение специалистов и ученых секции РАН «Научные проблемы электропитания» отделения «Электрофизика, энергетика, электротехника».

## 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. Дисс. ... канд. техн. 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. Дисс. ... докт. техн. 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. Дисс. ... канд. техн. 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. 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.3.1–16.
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. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1993. 90 p. Virginia Polytechnic Institute and State University. 1991. 161 p.
15. Cho B.H., Choi B. Analysis and design of multi-stage distributed power supply systems // Virginia Power Electronics Center Seminar Proc. 1991. P. 55–61.
16. Schulz S.E. System interactions and design considerations for distributed power systems. Master's thesis. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University. 1991. 161 p.
17. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Устойчивость и электромагнитная совместимость устройств и систем электропитания. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 540 с.

## The main scientific problems of building domestic aggregated (complex) devices and distributed power supply systems and the reasons for their characteristics lagging behind modern foreign analogs

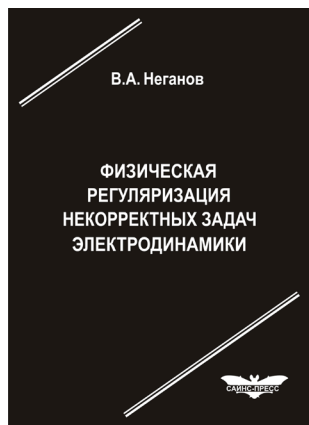
*V.F. Dmitrikov, D.V. Shushpanov*

The main problems of building domestic secondary power supply systems are considered. It is shown that the main problem in the construction of power supply systems with two- and three-time power conversion is the problem of stability. It is shown that separate subsystems with negative feedback operating in an autonomous mode with large stability reserves in amplitude and phase, being integrated into a single system because of mutual influence on each other, can be excited. The importance of determining the frequency characteristics of voltage converters is shown. The reasons for the lag in the characteristics of secondary power supply systems from modern foreign analogs are shown.

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

**Неганов, В.А.**

**Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн / В.А. Неганов. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. – 432 с., 122 ил.**



**ISBN 978-5-88070-161-2**

УДК 537.87

ББК 32.84

Н 41

Изложены основы физической регуляризации некорректных задач электродинамики, связанной с особенностями физических и математических моделей задач (физические допущения, некорректные математические выкладки, отсутствие предельного перехода). Подход, по мнению автора, обладает большими возможностями, чем метод регуляризации Тихонова А.Н. интегральных уравнений Фредгольма первого рода, названный в книге методом математической регуляризации. Метод физической регуляризации (МФР) применен к анализу волноведущих и излучающих структур, а также задачам дифракции электромагнитных волн на некоторых телах. МФР позволил впервые корректно осуществить анализ полей в ближних зонах некоторых антенн, устранить несамосогласованное приближение Кирхгофа в задачах дифракции, установить связь поверхностной плотности тока проводимости с напряженностями электрического и магнитного полей для диполя Герца и т. п.

*Для специалистов в области радиотехники и радиофизики СВЧ, электромагнитной совместимости РТС, математической теории дифракции и математического моделирования электродинамических структур самого широкого назначения. Может быть полезна преподавателям вузов, докторантам, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.*