

УДК: 621.37/.39

DOI: 10.26907/rwp29.2025.383-386

## ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОДУЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИИ, РАДИОНАВИГАЦИИ И СВЯЗИ

В.Ф. Дмитриков, Д.В. Шушпанов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д.22, к.1  
E-mail: dimasf@inbox.ru

**Аннотация.** Приведены различные способы рассмотрения модульного построения системы электропитания для различной радиоэлектронной аппаратуры: каскадное соединение, работа на комплексную нагрузку, работа на импульсную нагрузку. Показаны причины возникновения автоколебательного режима при модульном построении системы электропитания. Показана важность определения входного и выходного сопротивлений радиоэлектронной аппаратуры, а также модулей, из которых состоит система электропитания.

**Ключевые слова:** распределенная система электропитания; комплексная нагрузка; импульсная нагрузка; устойчивость, входное сопротивление, выходное сопротивление.

## MAIN PROBLEMS OF MODULAR CONSTRUCTION OF POWER SUPPLY SYSTEMS FOR RADIOELECTRONIC SYSTEMS OF RADAR, RADIONAVIGATION AND COMMUNICATION

V.F. Dmitrikov, D.V. Shushpanov

**Abstract.** Various methods of considering the modular design of a power supply system for various electronic equipment are presented: cascade connection, operation on a complex load, operation on a pulse load. The reasons for the occurrence of self-oscillating mode in the modular design of the power supply system are shown. The importance of determining the input impedance and output impedance of electronic equipment, as well as the modules that make up the power supply system, is shown.

**Keywords:** distributed power supply system; complex load; pulse load; stability, input impedance, output impedance.

### Введение

С развитием компонентной электронной базы за последние десятилетия произошло бурное развитие радиоэлектронных систем радиолокации, радионавигации и связи, что привело к улучшению различных функциональных характеристик данной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), а также к уменьшению их массогабаритных характеристик. Это, с одной стороны, накладывает более жесткие требования на систему электропитания такой РЭА – она стала более чувствительна к качеству электропитания: стабильность напряжения; величина пульсаций напряжений, тока; скачки и провалы напряжения и т. д. [1, 2]. С другой стороны, минимизация радиоэлектронных устройств приводит к необходимости также минимизации системы электропитания для неё [3]. Всё это было бы не такой тяжелой задачей, если бы не тот факт, что система электропитания для РЭА во многих случаях всё ещё строится по остаточному принципу – сначала проектируется сама РЭА, а далее в оставшемся свободном месте необходимо разместить систему электропитания для неё. Это связано с тем, что в стране оказалась большая нехватка специалистов по силовой электронике, и разработчики РЭА не всегда понимают с какими сложностями и трудностями приходится сталкиваться разработчикам системы электропитания. Современный модуль (и тем более система) электропитания представляет сложную систему [4].

Всё это усугубляется ещё тем фактором, что для каждой новой РЭА надо создавать свою систему электропитания с требуемыми функциональными и масса-габаритными характеристиками. С одной стороны, вопрос большой номенклатуры изделий и большого типонаименования систем электропитания для РЭА снимается её унификацией и её модульным принципом построения [5, 6]. С другой стороны, модульный принцип построения устройств и систем электропитания РЭА может привести как к ухудшению характеристик, так и к выходу

всей системы из строя [4, 7]. Унификация как отдельных узлов модуля электропитания (корректор коэффициента мощности, фильтр радиопомех, устройства защиты, преобразователь напряжения, выпрямитель и т. д.), так и самих модулей электропитания тоже может вывести из строя как отдельный модуль электропитания, так и всю систему электропитания.

Цель данного доклада – показать на различных примерах основные проблемы при модульном построении системы электропитания для различных радиоэлектронных систем, показать их причины, а также возможные способы их устранения.

### Каскадное соединение модулей

В [4, 7] было показано, что при каскадном соединении двух четырехполюсников передаточная функция получившегося четырехполюсника будет равна

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

где  $H_1(j\omega)|_{xx}$ ,  $H_2(j\omega)$  – комплексные передаточные характеристики соответственно первого и второго четырехполюсника,  $Z_{\text{ВЫХ}}^{(1)}(j\omega)$ ,  $Z_{\text{ВХ}}^{(2)}(j\omega)$  – комплексные выходные и входные сопротивления первого и второго четырехполюсника.

Таким образом, согласно (1) при двух каскадно-соединенных четырехполюсников возможен автоколебательный режим при выполнении условий [4, 7, 8]

$$\begin{cases} |Z_{\text{ВЫХ}}^{(1)}(j\omega)| = |Z_{\text{ВХ}}^{(2)}(j\omega)| \\ \arg(Z_{\text{ВЫХ}}^{(1)}(j\omega)) - \arg(Z_{\text{ВХ}}^{(2)}(j\omega)) = 180^\circ \end{cases} \quad (2)$$

даже если каждый четырехполюсник абсолютно устойчив.

Выражение (1) и условие автоколебательного режима (2) являются важными требованиями при построении системы электропитания при каскадном соединении модулей. Но они, к сожалению, являются требованиями для линейных систем. В [4] было показано как эти требования для линейных систем применять к нелинейным системам. Таким образом показано, что при каскадном соединении модулей устойчивость системы электропитания будет зависеть от входных и выходных сопротивлений отдельных модулей. В качестве примера автоколебательного режима на рис. 1 приведены частотные характеристики модуля и фазы входного сопротивления преобразователя напряжения и выходного сопротивления фильтра в системе «фильтр – преобразователь напряжения», в которой возникает автоколебательный режим, подтверждающий временными диаграммами входного и выходного напряжения преобразователя напряжения (рис. 2).

Стоит отметить, что, к огромному сожалению, ни один разработчик РЭА не предоставляет информацию о входном или выходном сопротивлении своей РЭА (он даже не знает, что это такое и зачем оно вообще нужно), что не позволяет использовать его РЭА для построения сложной системы, т.к. она может выйти из строя. Поэтому, одна из целей данного доклада – показать разработчику РЭА важность и необходимость измерения входного и выходного сопротивления его РЭА, показать как это можно сделать и показать последние достижения в использовании этих измерений при построении системы электропитания при каскадно-соединенных модулей его РЭА, а также РЭА и различных модулей других разработчиков, что и освещается в докладе.

### Работа преобразователя напряжения на линейную комплексную нагрузку

Альтернативным взглядом на каскадное соединение четырехполюсников является работа четырехполюсника на комплексную нагрузку [4]. Данный подход позволяет рассмотреть требования на петлевое усиление четырехполюсника, чтобы он устойчиво работал на требуемую комплексную нагрузку. Данный подход, как и предыдущий, требует знания о входном сопротивлении РЭА. В докладе на примерах показывается данный подход.

### Работа преобразователя напряжения на импульсную нагрузку

Кроме работы преобразователя на линейную комплексную нагрузку необходимо рассмотреть особенность работы преобразователя напряжения на импульсную нагрузку.

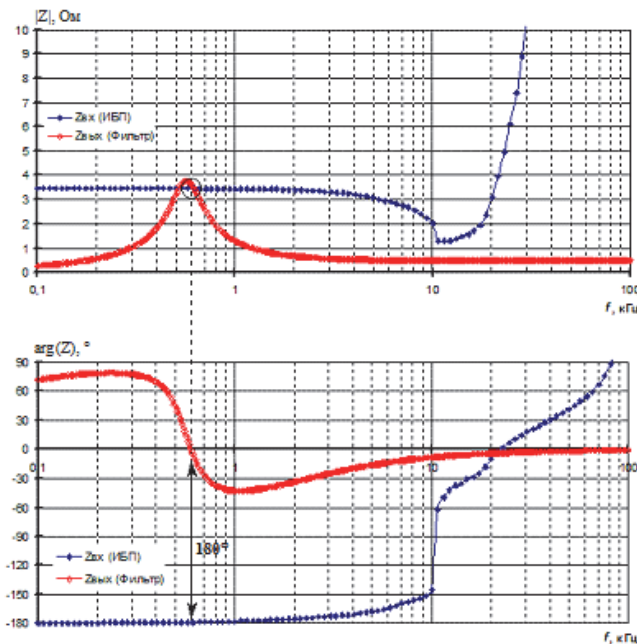


Рис. 1. Модуль и фаза входного сопротивления преобразователя и выходного сопротивления входного фильтра (автоколебательный режим)

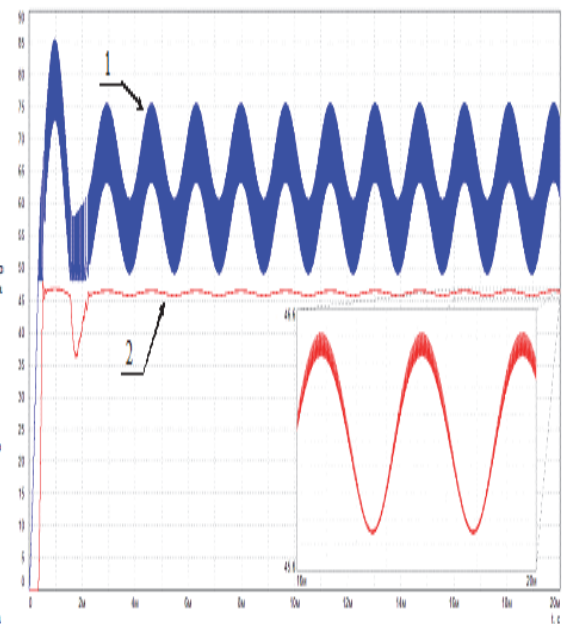


Рис. 2. Входное (1) и выходное (2) напряжения преобразователя напряжения (автоколебательный режим)

Главной особенностью работы источников электропитания на импульсную нагрузку, коими являются, например, источники питания приемо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток радиолокационной станции, заключается в переходных процессах, происходящих не только во время включения и выключения источников питания, но и в начале и конце каждого импульса [9].

Работа преобразователя напряжения на импульсную нагрузку значительно отличается от работы преобразователя на стационарную нагрузку, на которую обычно и проектируют преобразователи напряжения [9]. Для такого преобразователя напряжения необходимо выбирать определенные контура отрицательной обратной связи, а также выбирать определенные режимы работы преобразователя напряжения [9]. Поэтому необходимо с самого начала проектировать преобразователь напряжения, работающий на импульсную нагрузку, или выбирать из покупных преобразователей напряжения тот, который работает на такую нагрузку. Это очень важный момент при проектировании системы электропитания, не учет которого может в дальнейшем вывести всю систему электропитания из строя. В докладе показывается на различных примерах как различные контура ООС могут улучшить или ухудшить характеристики преобразователя, работающего на импульсную нагрузку. В качестве примера на рис. 3 приведена временная диаграмма выходного напряжения преобразователя напряжения, работающего на резистивно-емкостную импульсную нагрузку, показывающая ухудшение характеристик выходного напряжения преобразователя, что в дальнейшем может привести к выходу РЭА.

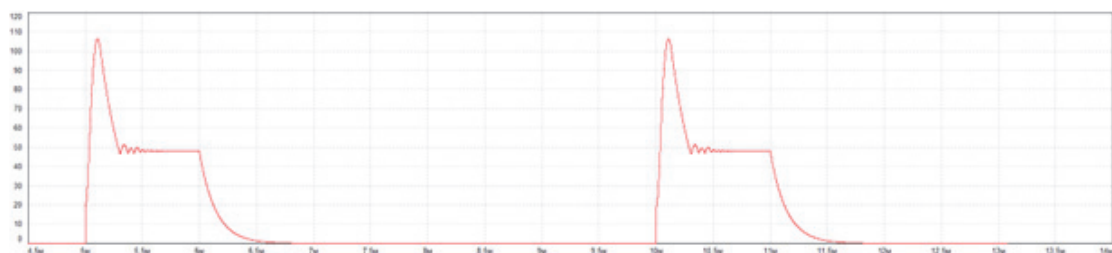


Рис. 3. Выходное напряжение преобразователя напряжения, работающего на резистивно-емкостную импульсную нагрузку

### Параллельное и последовательное соединение модулей

При построении системы электропитания РЭА кроме каскадного соединения модулей могут применяться также параллельные или/и последовательное соединение модулей [10]. Такой подход построения системы электропитания используется для увеличения мощности (особенно при использовании унифицированных модулей), а также для улучшения отказоустойчивости всей системы электропитания. В этом случае устойчивость системы электропитания удобно рассматривать через сопротивления отдельных модулей, что показывается в данном докладе.

### Заключение

В докладе показаны возможные причины выхода системы электропитания из строя при модульном построении системы электропитания. Показаны пути решения данной проблемы. Показано, что для грамотного построения системы электропитания РЭА необходимо знать входное и выходное сопротивления РЭА, а также входные и выходные сопротивления различных модулей в системе электропитания, что не предоставляется ни одним разработчиком РЭА, ни одним разработчиком модулей электропитания.

### Список литературы

1. Лернер И.М., Файзуллин Р.Р., Чернявский С.М. К вопросу повышения спектральной эффективности фазовых радиотехнических систем передачи информации, функционирующих при сильных межсимвольных искажениях // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2018. – № 1. – С. 113–118. EDN: YXHQQR
2. Кушнерев Н.А., Родин М.В. Особенности проектирования и тенденции развития систем электропитания АФАР бортовых радиолокаторов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2019. – Т. 17. – № 6. – С. 68–82. EDN: XGTXNB
3. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Проблемы электропитания в инфокоммуникациях и функциональной аппаратуры корабельной техники // В сборнике: Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТТТ-2014; Оптические технологии в телекоммуникациях ОТТ-2014 // Материалы Международных научно-технических конференций. – 2014. – С. 316–319. EDN: TOYCFP
4. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Устойчивость и электромагнитная совместимость устройств и систем электропитания. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 540 с. EDN: XYPAVF
5. Харченко И.А. Общие критерии-рекомендации к проектированию конверторных модулей авиационно-бортовых вторичных источников электропитания // Электропитание. – 2016. – № 2. – С. 22–27. EDN: ZBQHXH
6. Резников С.Б., Харченко И.А. Проблемы унификации модулей многофункциональных импульсных преобразователей для авиационно-бортовых систем электроснабжения и примеры их комплексно-схемотехнического решения // Практическая силовая электроника. – 2017. – № 3 (67). – С. 20–27. EDN: ZGSQYZ
7. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Устойчивость систем электропитания // Электропитание. – 2012. – № 2. – С. 5–19. EDN: ZEPHNP
8. Wildrick C.M. Stability of distributed power supply systems // Master's thesis / Virginia Polytechnic Institute and State University. – Blacksburg, 1993. – 90 p.
9. Dmitrikov V.F., Shushpanov D.V., Petrochenko A.Y., Zaytseva Z.V. Designing DC/DC Converters with Impulse Loads for Secondary Supply Systems of Transmit/Receive Modules for Active Phased Array Antennas of Radars // В сборнике: International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM. 21. Сеп. «21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2020». – С. 331–339. <https://doi.org/10.1109/EDM49804.2020.9153490>. EDN: EKUSGP
10. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В., Ким С.М., Ягубов З.Х. Исследование устойчивости параллельно включенных ИПН // Электропитание. – 2014. – № 2. – С. 4–10. EDN: ZCTODV