

# Системы электропитания РЭА:

## так что же у них внутри и снаружи?

Юрий Либенко

Алексей Воронцов

Сразу сделаем пояснение: в данной статье применяется термин «система электропитания РЭА» взамен давно применяемого «система вторичного электропитания РЭА», существовавшего вместе с термином «источник вторичного электропитания РЭА», замененным впоследствии в нормативно-технических документах (НТД) на «источник электропитания РЭА». Дело в том, что в НТД определение термина «первичный» относительно системы или источника электропитания и раньше нигде нельзя было найти. Под этим названием всегда подразумевался источник электроэнергии (ИЭ) любого вида (в том числе и система электроснабжения, включающая в себя и такой ИЭ), преобразующий тем или иным способом энергию неэлектрическую в электрическую, а потому являющийся «первичным» по сути.

Система электропитания (СЭ) представляет собой важнейшую вспомогательную часть РЭА. Основным назначением и одновременно главным требованием к СЭ является безотказное обеспечение функциональной части (ФЧ) РЭА электропитанием необходимого вида и качества в течение заданного интервала времени, в заданных режимах и условиях эксплуатации и без какого-либо участия со стороны пользователей РЭА (кроме ее включения и отключения). Отсюда и главный вывод: **«Штатное электропитание РЭА любого назначения, области применения, класса, вида и типа является неперенным и важным гарантом не только ее качественного функционирования, но и функционирования вообще».**

За последние 20–30 лет многие виды РЭА значительно усложнились, что стало причиной повышения требований к функциям и техническим характеристикам их СЭ. За тот же период усложнились и электромагнитная обстановка в системах электроснабжения (СЭС), питающих РЭА, также добавив немало проблем при реализации СЭ. Эти два фактора в основном и оказали решающее влияние на превращение предыдущих поколений СЭ, внешне простых и понятных большинству разработчиков ФЧ РЭА, в достаточно сложные аппаратные реализации, зачастую снабженные устройствами вычислительной техники с соответствующим программным обеспечением.

СЭ в составе РЭА получает исходную электроэнергию от ее источников различных видов с регламентированными номинальными значениями ее основных показателей — напряжения, частоты (для переменного тока), а также с нормированными видами и значениями показателей качества электроэнергии (ПКЭ). Поэтому во многих случаях с точки зрения разработчиков ФЧ РЭА и взаимодействующих с ними специалистов, обеспечивающих процесс создания РЭА в целом, задача разработки ее СЭ не представляется

технически сложной. Действительно, ведь в первом приближении функционально СЭ любой сложности в целом представляет собой лишь адаптер, предназначенный для сопряжения вышеупомянутых регламентированных номинальных значений, а также видов и значений показателей качества исходной электроэнергии с аналогичными характеристиками, требующимися для ФЧ РЭА. Такой подход породил и соответствующее мнение: наличие достаточного количества и уровня специалистов по средствам силовой электроники в процессе разработки РЭА не является принципиально необходимым, поскольку на современном рынке имеются практически любые силовые компоненты, а в Интернете — их технические характеристики и руководства по применению.

Наличие широкой и доступной номенклатуры большинства видов компонентов СЭ, особенно за рубежного производства, с одной стороны, и «упрощенное» самостоятельное проектирование СЭ разработчиками ФЧ РЭА (как следствие усиленной пропаганды простоты этого процесса со стороны производителей таких компонентов) — с другой, внесли значительный вклад в отставание технического уровня СЭ относительно ФЧ РЭА. В то же время количество специалистов в направлении устройств силовой электроники сокращается с каждым годом, а подготовка новых практически не проводится. Причина — та же. В итоге созданием СЭ «по совместительству» занимаются разработчики ФЧ РЭА, а потому и результат предсказуем. К авторам настоящей статьи такие специалисты не единожды обращались за консультацией, но реализация предложенного решения, как правило, была невозможна из-за проведения разработки СЭ уже на стадии изготовления опытных образцов.

Часто разработчики ФЧ РЭА применяют упрощенное отношение к задачам и проблемам, присущим СЭ, хотя и у нас в стране, и за рубежом в течение уже нескольких десятков лет специалистами по разработке средств силовой электроники приводились многочисленные контрдоводы. Публикация цикла статей касательно СЭ РЭА, объединенных тематически под частично общим названием, является очередной попыткой привлечь внимание разработчиков ФЧ РЭА к существующим в этом направлении проблемам и в общих чертах показать возможности их решения. В данной статье представлены общие направления в части СЭ, которым специалисты в области средств силовой электроники уделяют повышенное внимание. В следующих статьях цикла некоторые из этих направлений будут рассмотрены более подробно. Один из первых шагов на данном пути — рассмотрение наиболее значимых по отношению к ФЧ РЭА

технических характеристик СЭ с их последующей иерархической расстановкой, служащей основой как для текущей разработки, так и для выявления тенденций ее совершенствования.

Декларировать эту задачу несложно, чего нельзя сказать о ее решении. Существует принципиальная зависимость относительного расположения тех или иных свойств на иерархических уровнях от назначения РЭА и наличия ряда дополнительных, зачастую противоречивых, требований со стороны ее конкретной ФЧ. Известны теоретические предпосылки выбора компромиссных вариантов решений многокритериальных оптимизационных задач с помощью прикладной дисциплины — системного анализа. Не приводя подробное пояснение данного метода, отметим, что системный анализ начинается с синтеза альтернативных вариантов искомого решения, а завершается — сравнением альтернативных вариантов с помощью критерия предпочтения [1]. В процессе решения проблемы выбора оптимального варианта была установлена неоднозначность толкования самого понятия «оптимальный вариант». Это связано с существованием более одного показателя, используемого для сравнительной оценки альтернативных вариантов, а также с тем, что все они не могут иметь экстремальные значения при одном альтернативном решении. Поэтому понятие «оптимальный вариант» было заменено на «нехудший вариант», а сам выбор предложения проводить в два этапа: сначала из множества альтернативных вариантов отбраковываются худшие, а затем из оставшихся выбирают один компромиссный вариант.

Рассмотрим для примера перечень «требований, предъявляемых к системе электропитания преобразовательной техники» [1], приведенный в редакции его автора:

1. Обеспечение потребителей электрической энергией необходимого количества и качества.
2. Обеспечение надежности и бесперебойности работы системы. Время перерывов питания не должно превышать допустимого для данной аппаратуры.
3. Обеспечение необходимой длительности питания, быстроты его включения и удобства эксплуатации.
4. Отсутствие недопустимых электромагнитных помех.
5. Возможно большая стандартизация, нормализация и унификация элементов, узлов и деталей.
6. Способность выдерживать перегрузки и работать в требуемом диапазоне температур, влажности и давления воздуха.
7. Высокая экономичность, возможно меньшие габариты, масса и стоимость системы.

При отсутствии подробных сведений о конкретных требованиях к СЭ затруднительно поддержать или не согласиться с вышеприведенной «авторской» иерархией. Так, РЭА, предназначенная к применению на объектах с повышенным уровнем функциональной безопасности, количество которых в различ-

ных направлениях современной техники неуклонно растет, иерархия свойств ее СЭ, на наш взгляд, может быть представлена следующим образом:

1. Штатное функционирование СЭ в заданных режимах и условиях применения, при наличии необходимых внешних ресурсов, заключающееся в обеспечении потребителей электрической энергией необходимого количества и качества, а также в выполнении основных функций, при отсутствии которых данная электроэнергия не поступит к потребителям.
2. Безотказность функционирования СЭ при использовании ее по назначению с установленным критерием вероятности в течение заданного периода времени или наработки.
3. Живучесть СЭ, заключающаяся в ее способности длительно или в течение априорно установленного интервала времени обеспечивать электропитание ФЧ РЭА с возможным невыполнением некоторых ее второстепенных технических характеристик (функций, параметров), являющимся следствием отказа отдельных компонентов СЭ и (или) воздействия внешних факторов, ограниченно превышающих регламентированные условия эксплуатации.
4. Безаварийность СЭ при появлении в ней отказов, заключающаяся в предотвращении последующих электрических и (или) конструктивных повреждений других элементов, функциональных узлов СЭ или РЭА в целом, возгораний, задымления, в том числе с образованием едких и ядовитых продуктов горения, пробоя электрической изоляции, связанного с опасным воздействием электрического тока на здоровье и жизнь людей, обслуживающих РЭА, а также угрозы для окружающей среды.
5. Энергетическая эффективность СЭ.

Кстати, для СЭ, обеспечивающей электропитание специальной переносной РЭА от встроенного источника электроэнергии с ограниченным ресурсом, показатель энергетической эффективности СЭ может разместиться в приведенной иерархии с пятой позиции на вторую.

В большинстве вариантов СЭ их свойства в разной степени являются альтернативными. Так, нельзя одновременно обеспечить повышенную безотказность СЭ за счет резервирования части компонентов, то есть введения их аппаратной избыточности, и получить при этом минимальные габариты, стоимость и т. д.

Стремление максимально приблизить форму переменного тока, потребляемого СЭ, к синусоидальной вынуждает при электропитании от однофазного ИЭ с частотой 50 Гц применять на входе СЭ активный корректор коэффициента мощности (ККМ). Да, в таком случае возможно обеспечить значение коэффициента этой мощности не менее 0,95 против не более 0,7 у пассивного ККМ. Но на этом и заканчиваются все преимущества, терпеть же (если еще и получится!) приходится целый ряд отрицательных фак-

торов, связанных с его применением: увеличение габаритов, массы, кондуктивных и излучаемых СЭВ, стоимости, тепловыделения при снижении безотказности, живучести и т. д.

Вышеизложенное лишней раз подтверждает давно известный и никем еще не опровергнутый тезис: «За все надо платить!». В связи с этим для конкретной РЭА и ее СЭ целесообразно определить наиболее характерный вариант иерархии свойств последней, в котором они могут быть поделены на главные и N-степенные. В условиях наличия у разработчиков СЭ различных ограничений в возможностях совокупной реализации повышенных показателей для нескольких главных свойств некоторые из второй группы могут служить той «валютой», которую придется заплатить.

Теперь следует рассмотреть другой, не менее важный вопрос — основные виды совместимости СЭ с «внешним миром», без знания и комплексного решения которого трудно рассчитывать на положительный результат ее создания. Более подробное рассмотрение каждого вида не является целью данной статьи, но вполне заслуживает отдельной публикации вследствие его важности и специфики. К этим видам относятся:

- электрическая параметрическая совместимость с одним или несколькими ИЭ;
- электромагнитная (кондуктивная) совместимость (помехоустойчивость и помехоэмиссия) с ИЭ;
- электрическая параметрическая совместимость с питаемыми функциональными узлами (ФУ) РЭА;
- электромагнитная (кондуктивная и волновая) совместимость (помехоустойчивость и помехоэмиссия) с питаемыми ФУ РЭА;
- электромагнитная (кондуктивная и волновая) совместимость (помехоустойчивость и помехоэмиссия) с гальванически связанными внешними техническими средствами;
- электромагнитная (волновая) совместимость (помехоустойчивость и помехоэмиссия) с гальванически несвязанными внешними техническими средствами;
- информационная (алгоритмическая) совместимость с ФЧ РЭА;
- информационная (алгоритмическая) совместимость с внешней функционально взаимосвязанной РЭА, в том числе с устройствами (системами) управления и контроля;
- конструкционная совместимость с конструкцией ФЧ РЭА;
- совместимость с внешними воздействующими факторами в условиях эксплуатации РЭА, а также с воздействующими факторами, создаваемыми самой РЭА;
- совместимость с заданными показателями надежности РЭА;
- совместимость с условиями и правилами эксплуатации РЭА.

В зависимости от особенностей РЭА и, соответственно, ее СЭ перечень видов совместимости может изменяться.

Не менее важным аспектом является обеспечение «внутренней» совместимости

ФЧ-компонентов в самой СЭ, зачастую зависящей от результатов реализации приведенных выше внешних видов совместимости. Из этого следует, что выбор архитектуры и конкретизирующей ее структуры, внутренних связей СЭ, а также ее составных частей является многокритериальной задачей.

Большое количество требований, часто альтернативных, к СЭ вынуждает применять в ее составе значительный набор функциональных компонентов: преобразователей видов и значений показателей электроэнергии, сетевых защитных устройств, выпрямителей с корректором коэффициента мощности и без него, управляемых силовых коммутаторов, устройств управления, контроля, связи. Наличие на рынке широкой номенклатуры различных силовых модулей, применяемых разработчиками ФЧ РЭА для установки их непосредственно в среде ее функциональных узлов, создает эйфорию легкости такого же их применения и в составе СЭ. Неоднократно проведенный анализ наличия среди современных зарубежных и отечественных модульных силовых компонентов, соответствующих необходимым требованиям со стороны СЭ, показал в разной степени неудовлетворительный результат. Данная ситуация наиболее характерна для источников электропитания в виде электронных модулей (ЭМ) нулевого уровня разукрупнения (ЭМ-0). Изначально они содержали в своем составе практически полный набор необходимых функциональных узлов: сетевые высокочастотные фильтры, выпрямители, корректоры коэффициента мощности, преобразователи напряжения. В дальнейшем многие зарубежные и отечественные производители стали изготавливать эти узлы в виде самостоятельных изделий в формате ЭМ-0, предоставляя разработчику источников электропитания возможность самостоятельно выбирать их. Некоторые зарубежные производители в качестве условия поддержания гарантийных обязательств ставят использование полной «линейки» их компонентов, правда, в качестве «компенсации» дают достаточно подробную информацию о технических характеристиках, вариантах и правилах применения, в том числе рекомендации по их сопряжению.

В эксплуатационной документации отечественных ФУ в виде ЭМ-0 для источников электропитания, наоборот, подобные рекомендации часто отсутствуют. Например, это касается возможности последовательного или параллельного соединения выходных цепей однотипных преобразователей напряжения, обеспечения их устойчивой работы при параллельном подключении к общему выпрямителю в условиях электроснабжения СЭ от сети переменного тока в случае появления динамически изменяющихся значений нагрузки и (или) напряжения сети и других. Эти недостатки нередко приводили к возникновению нерегламентированных режимов функционирования ЭМ-0, вызывающих, в свою очередь, неустойчивую работу и отказы СЭ.

В качестве одного из главных направлений повышения оптимизации и эффективности СЭ ведущие специалисты в области средств силовой электроники неоднократно указывали на необходимость создания для них специализированных «системных» силовых модулей — компонентов, являющихся дополнением к существующим компонентам широкого применения. Кроме материальных, организационных и иных трудностей их создания, определенным тормозом являлось (и является поныне) отсутствие систематизации и унификации различных аспектов создания самих СЭ и их требований к компонентам. Отсутствие «системных» компонентов вынуждает в ряде случаев «подгонять» функциональные, параметрические и иные требования к СЭ со стороны РЭА под реальные возможности (читай: «недостатки») имеющихся компонентов, что так или иначе снижает планируемую эффективность СЭ.

Перейдем к рассмотрению существующих видов архитектуры СЭ, которая определяет ее технический облик, отображающий выбранный принцип построения, и служит верхним уровнем иерархии ее свойств. Структура является более низким уровнем иерархии свойств СЭ, отображающим конкретный вариант реализации выбранного принципа ее создания.

В свою очередь, уровень архитектуры СЭ определяется ее классом: централизованная, децентрализованная или комбинированная (частично централизованная или частично децентрализованная). Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки и может оказаться оптимальным в определенном варианте применения.

Основным функциональным узлом СЭ, входящим в любой класс ее архитектуры, является преобразователь напряжения (ПН) вида AC/AC, AC/DC, DC/AC или DC/DC. Классификация СЭ определяется не видом ПН, а тем, как он подключен своей входной и выходной (выходными) цепями к ИЭ и питаемой им нагрузке соответственно.

Исторически преобладала централизованная архитектура СЭ, при которой все ее функциональные узлы совокупно представляли электрическую и конструкционную моноструктуру преимущественно с одной, реже с двумя входными цепями, подключаемыми к ИЭ (соответственно, к одному или двум — основному и резервному).

Выходные цепи централизованной СЭ (ЦСЭ) подключаются непосредственно к питаемым ФУ РЭА. Количество выходных цепей СЭ определяется количеством групп ФУ РЭА с изолированными друг от друга входами электропитания с одинаковыми или разными значениями напряжения. В структуре такой СЭ чаще имеется один ПН с несколькими гальванически связанными или изолированными выходными каналами, реже — несколько одноканальных ПН. В первом случае в многоканальном ПН предусмотрен один наиболее мощный канал с цепью обратной связи, подключенной к его нагрузке, и N каналов с меньшим

значением выходной мощности. Для уменьшения перекрестной нестабильности между выходными каналами (влияние мощного канала на стабильность значения напряжения в остальных) в выходные цепи менее мощных выходных каналов устанавливаются дополнительные стабилизаторы напряжения. Для аналоговых ФУ РЭА, чувствительных к высокочастотным пульсациям напряжения, применяются стабилизаторы с непрерывным (линейным) регулятором, а для менее чувствительных видов нагрузки (в том числе цифровых ФУ) — стабилизаторы с импульсным (ключевым) регулятором напряжения. В ЦСЭ могут входить также необходимые дополнительные устройства (коммутации, контроля, служебного электропитания и др.), состав и функции которых определяются в соответствии с предъявляемыми к ней требованиями.

Децентрализованная СЭ (ДСЭ) состоит из необходимого количества и типов ПН, распределенных электрически и конструктивно по ФЧ РЭА, поэтому она называется еще и «распределенная СЭ». Каждый ПН функционирует автономно, может иметь один или несколько выходных каналов, получает входное напряжение от общей шины, подключаемой к внешнему ИЭ, а в составе ФЧ РЭА с несколькими ПН могут быть и дополнительные общие входные шины, подсоединенные к общей входной шине ДСЭ.

В составе комбинированной СЭ (КСЭ) имеется централизованная (ЦЧ СЭ) и децентрализованная (ДЧ СЭ) части. Основная функция первой — организация в СЭ шины постоянного (реже переменного) тока с одним из номинальных стандартных значений напряжения, являющегося общим входным напряжением для всех ПН в составе ДЧ СЭ.

В технически обоснованных случаях таких шин в ЦЧ СЭ может быть более одной с различными видами тока и значениями напряжения. Основным достоинством ЦЧ СЭ является обеспечение наиболее сложных видов совместимости с ИЭ (одним или несколькими) для всех ПН в ДЧ СЭ, упрощая в различных аспектах и обеспечивая, тем самым, повышенную безотказность их работы. Однако в данном случае ЦЧ СЭ сама становится узким местом в СЭ, требующим принятия специальных технических решений для снижения зависимости работы последней от этого недостатка. КСЭ способна предоставить пользователю ряд возможностей, принципиально не обеспечиваемых двумя другими видами архитектуры СЭ.

В заключение хотелось бы отметить еще одно обстоятельство, не способствующее улучшению общей ситуации в направлении средств силовой электроники, приведенной в начальной части данной статьи. На сегодня отсутствует единый нормативно-технический документ (НТД), определяющий суть и назначение СЭ в РЭА, общий объем требований и методов проверки их выполнения, на основе которого можно создать конкретизированные НТД, учитывающие специфику направления применения РЭА (СЭ).

В таком общем НТД, по мнению авторов, должны быть отражены следующие основные аспекты СЭ:

- определение;
- области распространения;
- направления применения;
- специфические термины и их определения;
- связь с действующими российскими и международными НТД;
- классификация;
- технические требования к:
  - назначению,
  - выполняемым функциям,
  - электрическим параметрам,
  - показателям надежности,
  - противоаварийности,
  - энергетической эффективности,
  - стойкости к непреднамеренным внешним воздействиям различных видов,
  - эргономике и технической эстетике,
  - техническому обслуживанию и ремонту,
  - безопасности,
  - стандартизации и унификации,
  - конструкции,
  - электромагнитной совместимости,
  - применяемой элементной базе.

В НТД должны содержаться типовые структурные схемы СЭ в соответствии с установленной классификацией, а также структурные схемы проверок их соответствия установленным требованиям, иллюстрирующие в общих чертах приведенные методы и средства проверки.

Вышеприведенные предложения не претендуют на полноту и совершенство, но могут служить основой при создании общего НТД на СЭ с обязательным участием специалистов в области средств силовой электроники, обладающих знаниями и опытом в различных направлениях ее применения.

Публикация данной и последующих статей из цикла, посвященного созданию СЭ для современной РЭА, имеет цель дать некоторую общую картину для тех, кто хочет сначала понять предмет разработки хотя бы в общих чертах, а затем создать ее в «железе». Готовы также оказать разработчикам РЭА и практическое содействие, но с одним условием — все должно проводиться своевременно. Известная фраза «Время — деньги» здесь не работает, так как никакие деньги при нехватке времени не выручают.

Учитывая трудности чтения многостраничного текста с большим количеством имеющихся в нем специфических аббревиатур,

ниже приводим их перечень в алфавитном порядке с расшифровками:

ДСЭ — децентрализованная СЭ РЭА;  
 ДЧ СЭ — децентрализованная часть КСЭ;  
 ИЭ — источник электроэнергии;  
 ККМ — корректор коэффициента мощности;  
 КСЭ — комбинированная СЭ РЭА;  
 НТД — нормативно-технический документ;  
 ПКЭ — показатель качества электроэнергии;  
 ПН — преобразователь напряжения;  
 СЭ — система электропитания РЭА;  
 СЭС — система электроснабжения;  
 ФУ — функциональный узел (РЭА, СЭ);  
 ФЧ — функциональная часть (РЭА, СЭ);  
 ЦСЭ — централизованная СЭ РЭА;  
 ЦЧ СЭ — централизованная часть КСЭ;  
 ЭМ — электронный модуль;  
 ЭМ-0 — электронный модуль нулевого уровня разукрупнения.

*Продолжение следует.*

### Литература

1. Жерненко А. С. Компромисс из нехудших вариантов // Электрическое питание. 2001. № 1.