

Системы электропитания РЭА:

пути повышения безотказности

В предыдущей статье цикла «Системы электропитания РЭА» [1] соавторами рассмотрен ряд основных проблем создания современных систем электропитания (СЭ) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), с которыми так или иначе встречаются разработчики при стремлении получить результат в части их безотказности, адекватный достигаемому для функциональной части (ФЧ) этой РЭА. Там же, в [1], анонсировано создание цикла статей, объединенных вышеупомянутой общей частью названия, с целью показать возможные пути решения этих проблем. В конце данной статьи в алфавитном порядке приведен перечень использованных аббревиатур и их расшифровка.

Юрий Либенко

Алексей Воронцов

В связи с особой важностью повторим основное назначение и одновременно главное требование к СЭ, приведенное в [1]: «Безотказное в течение заданного интервала времени обеспечение ФЧ РЭА электропитанием необходимого вида и качества в заданных режимах и условиях эксплуатации без какого-либо участия со стороны пользователей РЭА (кроме ее включения и отключения)».

Ухудшение качества или перерыв в подаче электропитания на ФЧ РЭА от СЭ происходит в большинстве случаев по двум причинам:

- выход за регламентированные пределы значений показателей качества, в том числе исчезновение электроэнергии в централизованной системе электроснабжения (СЭС) или от автономного источника электроэнергии (ИЭ);
- отказ СЭ.

Первая причина вызывает необходимость принятия дополнительных мер с помощью специальных технических средств. Эти меры известны, достаточно отработаны и не являются предметом рассмотрения в данной статье.

Вторая причина может быть устранена только повышением безотказности СЭ. По определению [2], надежность любого технического объекта является комплексным свойством, которое в зависимости от его назначения и условий применения может включать такие единичные показатели, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или их определенные сочетания в виде комплексных показателей. Для рассматриваемого технического объекта в виде СЭ, учитывая ее вышеприведенное основное назначение, важнейшим и наиболее сложным для реализации аспектом является обеспечение заданного значения показателя безотказности в течение установленного периода времени применения по назначению.

Значение показателя безотказности СЭ определяется априори расчетным путем, исходя из ее назначения и основных свойств, структурной схемы надежности, наличия и способа резервирования и других факторов. Рассмотрим возможные способы резервирования как основного способа повышения безотказности для трех основных видов СЭ, приведенных в [1]: централизованной, распределенной (децентрализованной) и комбинированной (частично централизованной или частично децентрализованной).

Централизованная СЭ (ЦСЭ), как правило, совокупно представляет собой моноструктуру, не содержащую съемных конструктивных модулей в виде типовых элементов замены (ТЭЭ) и выполненную в виде устройства-моноблока, либо встраиваемого в РЭА, либо внешнего, имеющего собственное конструктивное исполнение. Первый вариант для электропитания функциональных узлов (ФУ) одноступенчатой РЭА с использованием общего конструктивного модуля (КМ) приведен на рис. 1а, второй — для электропитания ФУ РЭА, размещенной в нескольких КМ, — на рис. 1б. В обоих вариантах выходные цепи ЦСЭ изображены однолинейными условно.

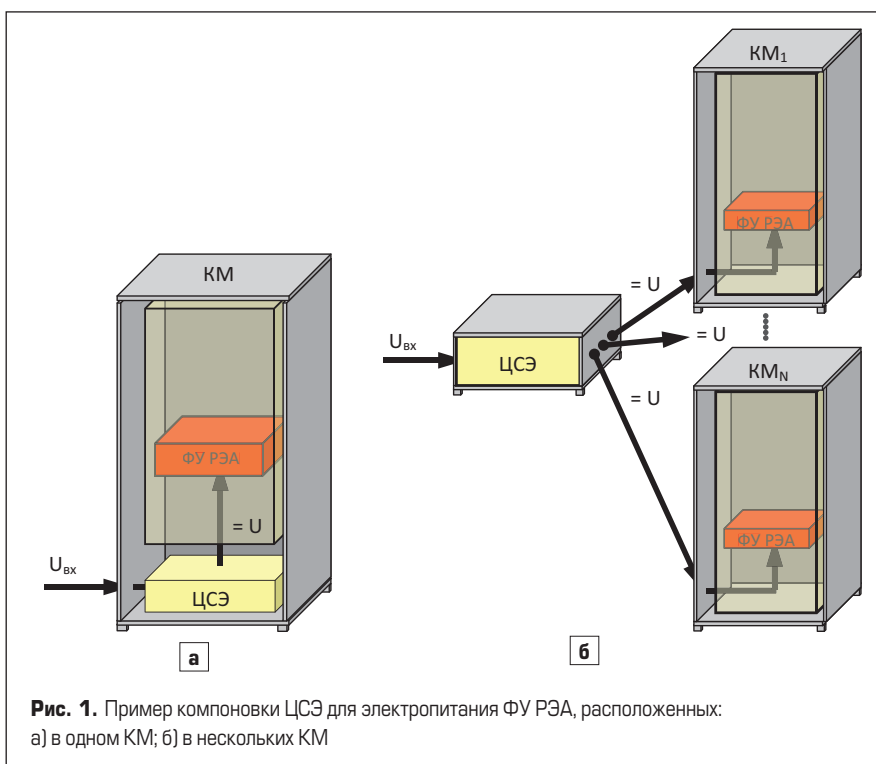


Рис. 1. Пример компоновки ЦСЭ для электропитания ФУ РЭА, расположенных: а) в одном КМ; б) в нескольких КМ

Их количество, как показано в [1], определяется количеством групп ФУ РЭА с изолированными друг от друга входами электропитания, с одинаковыми или разными значениями напряжения.

Входные цепи ЦСЭ, изображенные однолинейными на рис. 1а, б также условно, могут обеспечивать различные варианты подключения к централизованным СЭС или автономным ИЭ, что показано на рис. 2а–в.

Электрооснащение ЦСЭ с одним входным портом (рис. 2а) может быть как от одной СЭС (одного ИЭ), так и от внешнего автомата ввода резерва (АВР), подключенного своими входными цепями к двум или более СЭС (ИЭ), а также от источника бесперебойного электропитания. Это в определенной степени решает ранее упомянутую проблему ухудшения качества или исчезновения электроэнергии на входе СЭ. При отсутствии внешних специальных устройств эта проблема может быть решена в СЭ с двухпортовым входом электрооснащения (рис. 2б, в).

Распределенная СЭ (РСЭ) достаточно подробно описана в [1], поэтому в данной статье не приведены иллюстрации в части ее размещения и функционирования в РЭА.

Последующее изложение материала, касающегося путей повышения безотказности СЭ, в силу ряда причин, пояснение которых также имеется в [1], в наибольшей степени относится к комбинированной СЭ (КСЭ). Напомним лишь о наличии в ее составе двух функциональных частей: централизованной (ЦЧ) и распределенной (РЧ), принципиально отличающихся от созвучных с ними и упомянутых выше ЦСЭ и РСЭ.

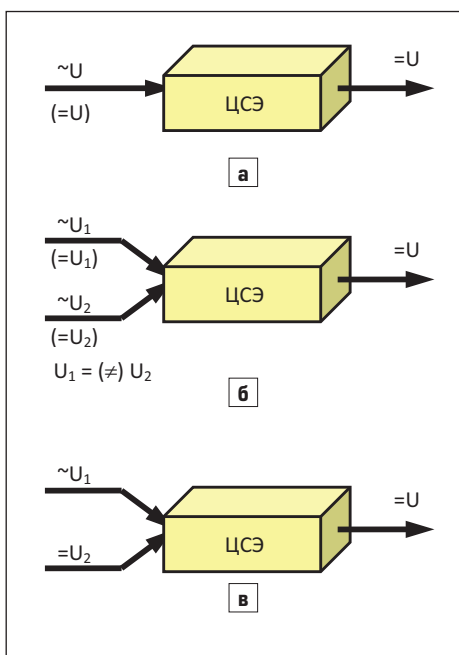


Рис. 2. Варианты подключения входа (входов) ЦСЭ к централизованным СЭС (к автономным ИЭ): а) к одной СЭС (ИЭ) переменного (постоянного) тока; б) к двум одинаковым (разным) СЭС (ИЭ) переменного (постоянного) тока; в) к двум СЭС (ИЭ): переменного и постоянного тока

Основные варианты компоновки ЦЧ и РЧ КСЭ для электропитания ФУ РЭА, расположенных в одном КМ, приведены на рис. 3а, а для электропитания ФУ РЭА, расположенных в нескольких КМ, — на рис. 3б.

Варианты подключения входа (входов) ЦЧ КСЭ к централизованным СЭС (к автономным ИЭ) аналогичны приведенным для ЦСЭ (рис. 2).

В [1] представлены сведения более чем о десятке существующих аспектов совместности СЭ РЭА любого из трех видов с внешними воздействующими факторами, в различной степени оказывающих влияние на штатное функционирование СЭ и, следовательно, питаемых от нее ФУ РЭА. Это наиболее проблематично для РСЭ, так как каждый из ее независимых преобразователей напряжения (ПН) должен соответствовать практически всему набору требований в части ранее упомянутой совместности, что становится весьма непростой задачей. Даже установка на общем входе электрооснащения РСЭ общих (групповых) для всех ПН защитных функциональных узлов — ВЧ-фильтров, ограничителей импульсов напряжения, защиты от сверхнормативного повышения/понижения значения входного напряжения и других видов — бывает недостаточной для обеспечения требуемого уровня сопряжения с СЭС (автономным ИЭ). Кроме того, эти общие узлы являются узким местом для РСЭ в части обеспечения безотказности всего тракта «источник электроэнергии — ФУ РЭА», а также могут привести к усилению взаимовлияния ПН РСЭ за счет непреднамеренного образования общих контуров с реактивными и нелинейными элементами с протекающими через них индивидуальными входными токами ПН.

В различной степени схожая ситуация наблюдается и для ЦСЭ, в зависимости от ре-

ализованного в ней способа образования выходных каналов электропитания ФУ РЭА.

Наилучший результат может быть достигнут в КСЭ при целенаправленном решении основных проблем совместности с СЭС (с автономным ИЭ) с помощью ее ЦЧ, создающей на выходе достаточно «чистую» шину постоянного тока для всех ПН в РЧ.

Отсюда следует важный вывод: *чем больше функций обеспечивает ЦЧ КСЭ, тем проще, гибче и безотказнее реализуется ее РЧ.* Вследствие обеспечения на выходе ЦЧ КСЭ шины с высококачественным промежуточным напряжением постоянного тока появляется возможность применения в ее РЧ малогабаритных унифицированных ПН класса DC/DC с упрощенными требованиями к ним. В последующей части тракта «источник электроэнергии — ФУ РЭА» могут быть созданы дополнительные промежуточные шины постоянного тока с теми же, что и для общей шины, или иными значениями напряжения с подключением к ним входных цепей конечных ПН РЧ (более подробно тема будет рассмотрена в следующих статьях цикла).

Очевидно и обратное: *с упрощением РЧ КСЭ без принятия специальных мер усложняется ее ЦЧ, что, как следствие, может понизить безотказность ее и КСЭ в целом.* Значительные преимущества РЧ, оказывающей основное влияние на штатное функционирование ФУ РЭА, оправдывают некоторые сложности создания совершенной ЦЧ, избавляющей от тиражирования решений сложных технических вопросов в каждом ПН РЧ.

Для окончательного перехода к более подробному рассмотрению основной темы данной статьи подведем итоги на основании рассмотренных примеров для ЦСЭ, РСЭ и КСЭ.

С достаточно большой степенью достоверности можно предположить, что *отказ большинства элементов ЦСЭ может привести*

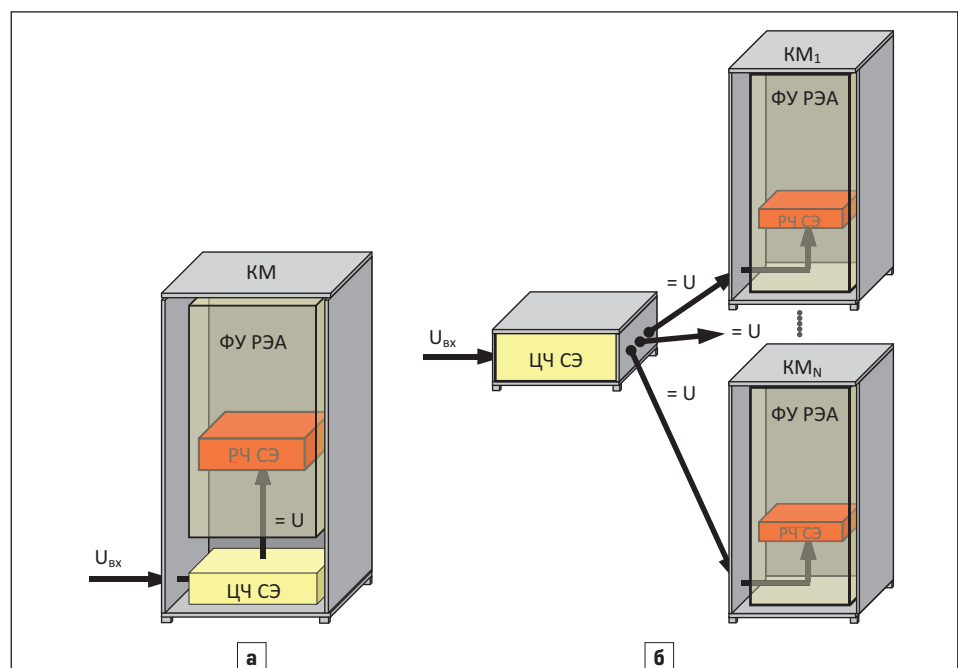


Рис. 3. Пример расположения ЦЧ и РЧ КСЭ для электропитания ФУ РЭА, расположенных: а) в одном КМ; б) в нескольких КМ

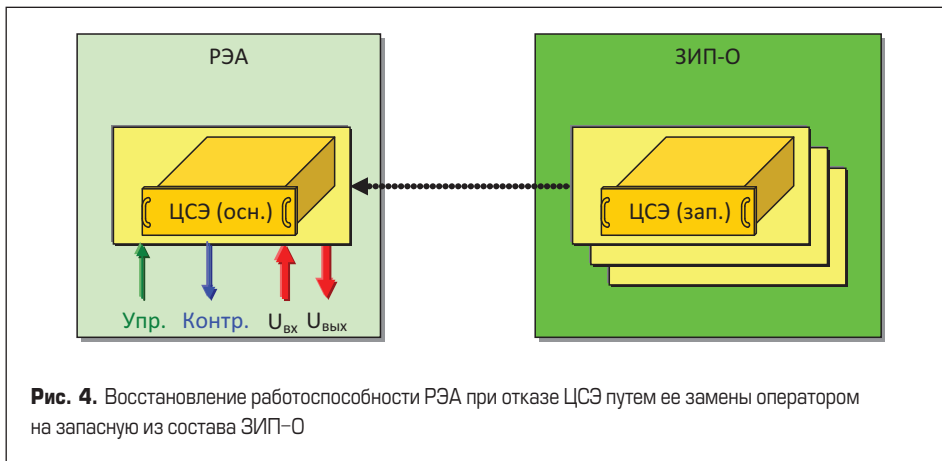


Рис. 4. Восстановление работоспособности РЭА при отказе ЦСЭ путем ее замены оператором на запасную из состава ЗИП-О

и к неработоспособному состоянию как ее самой, так и ЦСЭ в целом. Поэтому потенциальными способами восстановления ее работоспособности в условиях эксплуатации могут быть замена отказавшей ЦСЭ на исправную запасную при включении последней (одной или нескольких) в состав одиночного комплекта запасных частей (ЗИП-О) или резервирование в составе РЭА.

Согласно определению [2], под резервированием понимается способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимому, для выполнения требуемых функций. Таким образом, в случае применения варианта резервирования (на основании априорного расчета безотказности) кроме основной ЦСЭ в РЭА должны содержаться К резервных, что определяет кратность резервирования [2], увеличивает массогабаритные характеристики и стоимость РЭА.

Рассмотрим более подробно возможные варианты восстановления работоспособности РЭА при отказе ее ЦСЭ с моноблочной архитектурой.

Первый из них, не являющийся резервированием, представлен на рис. 4. Он предусматривает замену оператором отказавшей ЦСЭ на запасную из состава ЗИП-О.

При получении аварийного сигнала от отказавшей ЦСЭ оператор РЭА должен выполнить следующее:

- отключить входное напряжение ЦСЭ;
- отключить и извлечь отказавшую ЦСЭ из РЭА;
- извлечь запасную ЦСЭ из ЗИП-О и доставить ее к РЭА (с учетом возможной удаленности ЗИП-О);
- установить и подключить запасную ЦСЭ в РЭА;
- включить входное напряжение ЦСЭ;
- проконтролировать работоспособное состояние замененной ЦСЭ.

Такой процесс восстановления работоспособности РЭА может потребовать значительного времени (десять минут), что определяет продолжительность ее простоя.

Для того чтобы значительно сократить этот процесс, возможно применение автоматического резервирования ЦСЭ способом замещения [2], как показано на рис. 5. Для этого в РЭА устанавливается основная и резервная ЦСЭ, причем порядок использования каждой регламентирован: основная ЦСЭ включается и отключается по алгоритму работы РЭА, а ненагруженная резервная не включается до возникновения отказа основной.

К обоим ЦСЭ подключены все необходимые силовые и сигнальные цепи (контроля

и управления), позволяющие выполнить ручное или автоматическое управление резервированием в зависимости от заданных требований к безотказности РЭА. В первом случае контроль состояния основной ЦСЭ и переключение на резервную выполняет оператор РЭА, во втором — автоматическим способом узел контроля и управления, определяющий неисправное состояние основной ЦСЭ по значению его выходного напряжения и выдающий на узел коммутации соответствующие управляющие сигналы. При этом входная и выходная цепи отказавшей ЦСЭ отключаются от входа электропитания РЭА и ФУ РЭА соответственно. Поддержание непрерывности напряжения электропитания ФУ РЭА (одного или нескольких номиналов) на время переключения ЦСЭ в обоих случаях можно обеспечить за счет энергоемких накопительных элементов постоянного тока (например, суперконденсаторов), устанавливаемых в этих узлах.

При необходимости поддерживать работоспособное состояние ЦСЭ в течение более продолжительного времени предусматривается наличие ЗИП-О с одной или несколькими запасными ЦСЭ.

Ручной способ управления резервированием существенно снижает время восстановления ЦСЭ (единицы-десятки секунд) по сравнению с вариантом ее замены из ЗИП-О (рис. 4), однако также требует участия оператора РЭА.

Автоматическое резервирование еще больше сокращает время восстановления ЦСЭ (доли-единицы секунд) и освобождает оператора РЭА от участия в данном процессе (кроме замены из состава ЗИП-О).

Другой способ автоматического резервирования ЦСЭ, также с частичным участием оператора РЭА, при необходимости, представлен на рис. 6. Здесь деление на основную и резервную ЦСЭ условно, поскольку обе включаются сразу, а их выходные цепи соединяются с нагрузкой через диодную развязку. Ток в нагрузку поступает от ЦСЭ с наибольшим значением выходного напряжения, и при ее отказе автоматически выполняется замещение на другую, практически безобрывно для нагрузки. Ситуация с использованием запасных ЦСЭ из состава ЗИП-О аналогична рассмотренной для предыдущего способа (рис. 5).

Все приведенные варианты восстановления работоспособности ЦСЭ имеют общий и довольно существенный недостаток — при отказе ЦСЭ ее приходится заменять из состава ЗИП-О или резервировать в целом.

Технико-экономическая эффективность такой замены крайне мала, поскольку приходится иметь в РЭА и (или) в ЗИП-О не менее одной дополнительной аналогичной ЦСЭ, что увеличивает массогабаритные показатели и удорожает РЭА в целом. Восстановление работоспособности отказавшей ЦСЭ, как правило, невозможно провести на объекте эксплуатации, что повышает и эксплуатационные затраты при отправке ее на ремонт.

Достижение более высоких значений безотказности основных видов силовых преобразо-

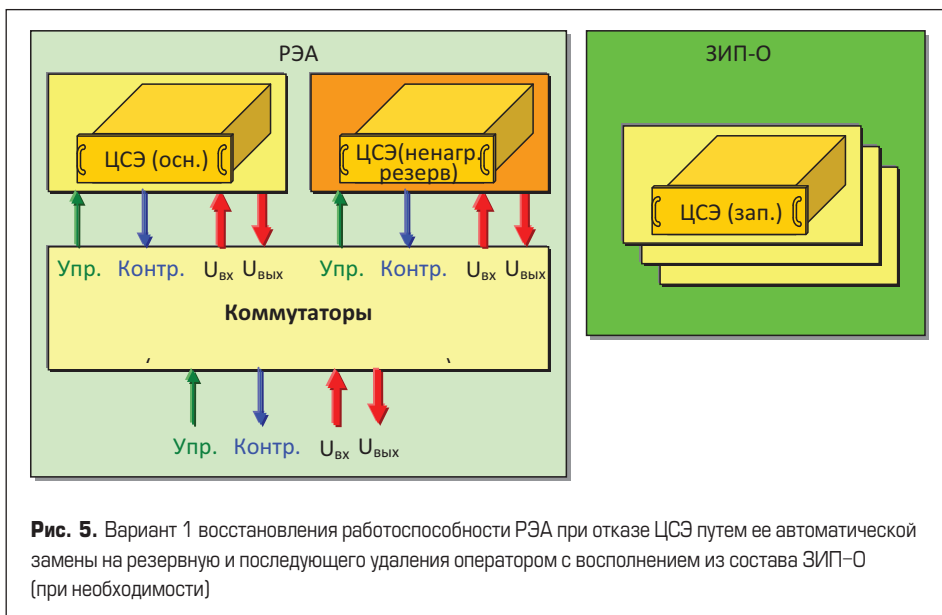


Рис. 5. Вариант 1 восстановления работоспособности РЭА при отказе ЦСЭ путем ее автоматической замены на резервную и последующего удаления оператором с восполнением из состава ЗИП-О (при необходимости)

вательных устройств (СПУ): AC/DC, AC/AC, DC/AC, DC/DC — как таковых наряду с получением других преимуществ (внутри- и межпроектная унификация, снижение эксплуатационных расходов и др.) принципиально возможно при их реализации на базе модульной архитектуры. Однако это выполняется при наличии в СПУ только одного канала выходного напряжения. Поэтому для ЦСЭ, формирующих, как правило, несколько выходных напряжений с одним или несколькими различными значениями напряжений, реализация данного способа практически не представляется возможной.

Существенным отличием модульной архитектуры ЦЧ КСЭ от моноблочной является применение в первой определенного количества (N) идентичных ПН вида AC/DC, AC/AC, DC/AC или DC/DC в формате силовых модулей (СМ), являющихся ТЭЗ с параметрической, функциональной и конструктивной автономностью. Каждый СМ выполняет основную функцию ЦЧ — преобразование напряжения, но на более низком уровне выходной мощности. Суммирование значений выходной мощности всех СМ на общей выходной шине ЦЧ обеспечивает в нагрузке (ФУ РЭА) заданное значение мощности ЦЧ КСЭ. Сразу уточним: *условием реализации этого является возможность СМ в необходимом количестве работать совместно и параллельно по выходу с бесконфликтным распределением значений выходных токов СМ тем или иным способом.* Существует несколько таких способов, применение каждого из них может быть выбрано для конкретных условий работы в СПУ. Подробности их реализации относятся к схемотехнике самих СМ и в данной статье не рассматриваются.

Главное преимущество модульной архитектуры ЦЧ КСЭ перед моноблочной состоит в следующем: *отказ элемента или функционального узла в одном любом из СМ может вызвать зависимый отказ только этого СМ, то есть потерю только 1/N части выходной мощности ЦЧ КСЭ.* Практически «единичная» выходная мощность одного СМ должна иметь значение порядка 15–20% от значения выходной мощности КСЭ, что и определяет оптимальное количество СМ в ЦЧ КСЭ. Больше количество СМ усложняет процесс управления ими, а меньшее — приводит к снижению гибкости и эффективности ЦЧ КСЭ. Данное обстоятельство упрощает и удешевляет решение вопроса повышения ее безотказности, так как отказавший СМ, как ТЭЗ, может быть оперативно определен и тем или иным образом заменен исправным. От способа реализации последней операции будет зависеть время восстановления работоспособности ЦЧ КСЭ (РЭА в целом), а также выполнение требования к КСЭ РЭА в части безотказности в течение заданного времени эксплуатации.

Далее рассмотрим достоинства и недостатки различных способов реализации указанных процессов, а также некоторые дополнительные возможности модульных архитектур СПУ любого вида: AC/DC, AC/AC, DC/AC или DC/DC как самостоятельного применения, так

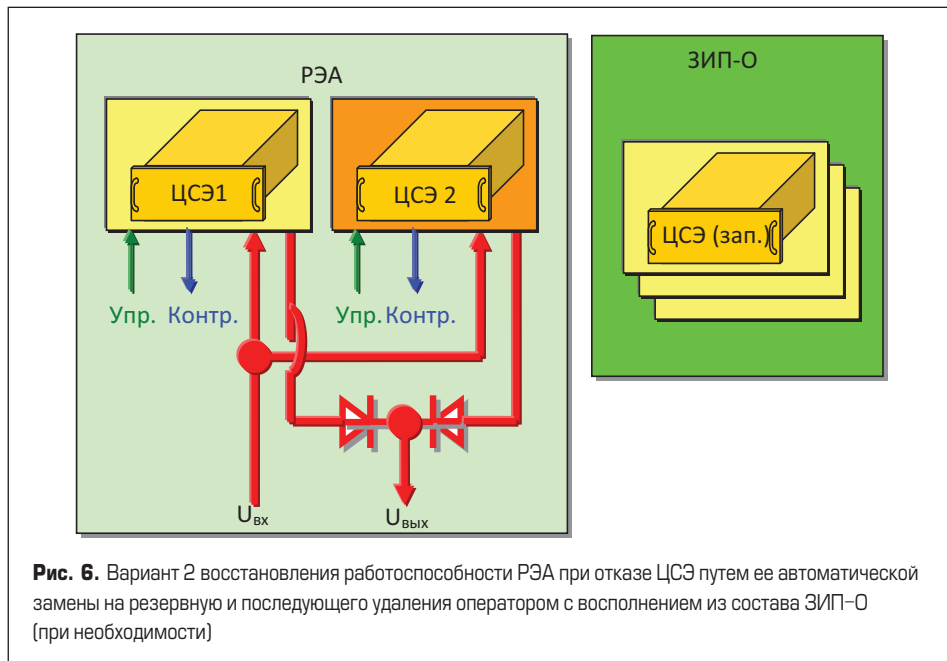


Рис. 6. Вариант 2 восстановления работоспособности РЭА при отказе ЦСЭ путем ее автоматической замены на резервную и последующего удаления оператором с восполнением из состава ЗИП-О (при необходимости)

и в составе ЦЧ КСЭ. При этом теоретически возможный, но практически не используемый вариант применения в модульной архитектуре СПУ только N СМ и замены отказавшего из них на работоспособный из состава ЗИП-О (аналогичный приведенному на рис. 1) не рассматриваем ввиду отсутствия в нем требуемой эффективности.

Наиболее распространенным способом резервирования является «N+1», приведенный на рис. 7, при котором в структуре СПУ применены $N+1$ СМ.

При данном способе резервирования N СМ в совокупности обеспечивают заданное значение выходной мощности СПУ на его общей выходной шине, а один дополнительный резервный СМ увеличивает это значение на $1/N$ суммарной мощности, что дает возможность обеспечить нагрузку номинальным значением мощности при отказе одного любого СМ из числа $N+1$. При этом поддержи-

вается безобрывность выходного напряжения, а значение выходной мощности СПУ изменяется от повышенного к номинальному. Для предотвращения влияния отказавшего СМ на работу остальных выходы всех СМ подключены к общей силовой шине СПУ через блокирующие диоды.

Практически деление СМ в СПУ на основные и резервные — условное, резерв является нагруженным, а способ «N+1» соответствует виду скользящего резервирования [2].

Для поддержания безотказной работы СПУ в расчетный период эксплуатации при заданных способе и периодичности проведения регламентно-восстановительных работ обычно предусматривается ЗИП-О, содержащий необходимое количество (K) запасных СМ. При отказе одного из $N+1$ СМ оператор РЭА может «на ходу» (без отключения СПУ) заменить отказавший СМ на запасной из состава ЗИП-О. Положительный результат при

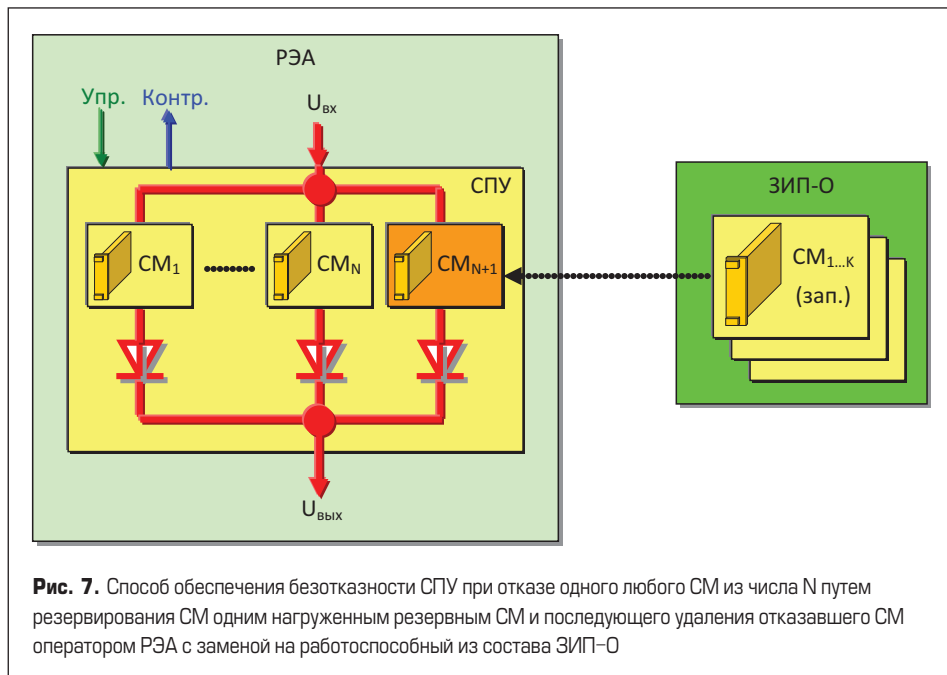


Рис. 7. Способ обеспечения безотказности СПУ при отказе одного любого СМ из числа N путем резервирования СМ одним нагруженным резервным СМ и последующего удаления отказавшего СМ оператором РЭА с заменой на работоспособный из состава ЗИП-О

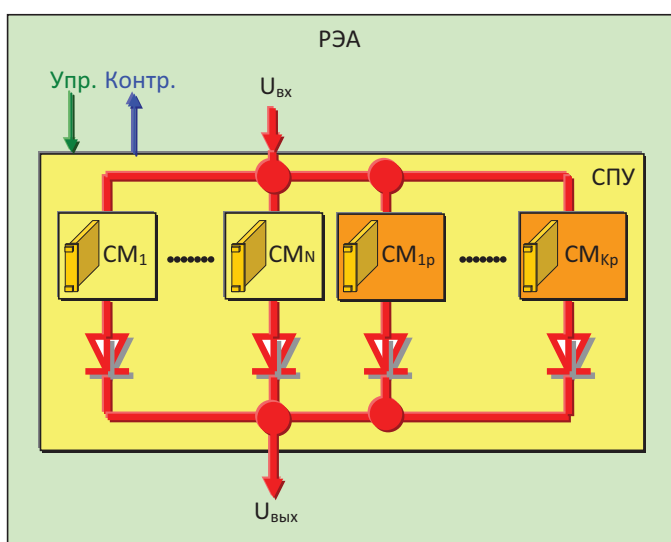


Рис. 8. Способ обеспечения безотказности СПУ при независимых отказах К СМ из числа N путем их резервирования К СМ в режиме нагруженного резерва

данном способе резервирования достигается только в том случае, если оператор своевременно восстановит СПУ, то есть обнаружит отказавший СМ и заменит его запасным. Иначе следующий отказ любого из N оставшихся СМ вызовет отказ всего СПУ. Данное обстоятельство, а также необходимость привлечения оператора РЭА к текущему проведению восстановительных работ являются существенными недостатками этого способа.

С целью их устранения для СПУ с модульной архитектурой может быть применен другой вариант скользящего резервирования: «N+K», приведенный на рис. 8. Он отличается от предыдущего способа «N+1» установкой в СПУ сразу K резервных СМ (значение K определяется априорным расчетом) и подключением их дополнительно к N основным в режиме нагруженного резерва. Резерв СМ по способу «N+K» поддерживает работоспособность СПУ до момента наступления события $K = 0$.

Основной недостаток данного способа резервирования — снижение исходного значения безотказности СПУ при последовательных отказах СМ от N+K до N. Кроме того, с отказом каждого из СМ пропорционально увеличивается коэффициент нагрузки по мощности всех остальных работоспособных, что в свою очередь изменяет значение их КПД.

Существенным недостатком данного способа резервирования также является нераациональное использование резервного ресурса СПУ, обусловленное отсутствием гибкости ее структуры, то есть невозможность:

- управления резервным ресурсом СМ;
- оперативного (автоматического) штатного отключения избыточных основных и резервных СМ при длительных уменьшениях значения мощности нагрузки с целью снижения расхода их ресурса;
- аварийного отключения и блокировки повторного включения отказавших СМ для предотвращения развития аварийных ситуаций в СПУ;
- реализации в СПУ временной или циклической ротации СМ, позволяющей более равномерно вырабатывать их ресурс, а также ситуационной ротации СМ, обеспечивающей адаптацию СПУ к ряду возникающих внешних или внутренних нештатных ситуаций.

В следующей статье цикла «Системы электропитания РЭА» данная тема будет продолжена с рассмотрением наиболее эффективного способа повышения безотказности СПУ в виде ЦЧ КСЭ на основе магистрально-модульной архитектуры (ММА), примера реализации и ряда специфических возможностей такого

Перечень примененных в статье аббревиатур и их расшифровка

- АВР** — автомат ввода резерва;
- ЗИП-О** — комплект запасных частей и принадлежностей одиночный;
- ИЭ** — источник электроэнергии;
- КМ** — конструкционный модуль;
- КСЭ** — комбинированная СЭ РЭА;
- ММА** — магистрально-модульная архитектура;
- ПН** — преобразователь напряжения;
- ПО** — программное обеспечение;
- РСЭ** — распределенная СЭ;
- РЧ** — распределенная часть КСЭ;
- РЭА** — радиоэлектронная аппаратура;
- СК** — силовой канал СМ;
- СМ** — силовой модуль;
- СПУ** — силовое преобразовательное устройство;
- СЭ** — система электропитания РЭА;
- СЭС** — система электроснабжения;
- ТЭЗ** — типовой элемент замены;
- ФЧ** — функциональная часть;
- ФУ** — функциональный узел;
- ЦСЭ** — децентрализованная СЭ РЭА;
- ЦЧ** — централизованная часть КСЭ.

СПУ, а также обновленной идеологии создания РЧ КСЭ.

Продолжение следует

Литература

1. Либенко Ю., Воронцов А. Системы электропитания РЭА: так что же у них внутри и снаружи? // Силовая электроника. 2021. № 4.
2. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.