

УДК 621.314.58

Ю.Н. Либенко, Г.Я. Михальченко, А.Н. Четин

Специфические возможности систем вторичного электропитания с магистрально-модульной архитектурой

Рассматривается концепция создания интеллектуальных систем вторичного электропитания (СВЭП) с магистрально-модульной архитектурой (ММА), обеспечивающих параметрическую многовариантность и адаптивность к различным внутренним и внешним эксплуатационным ситуациям.

Ключевые слова: система вторичного электропитания, магистрально-модульная архитектура, резервирование, безотказность, параметрическая многовариантность.

Концепция создания СВЭП с ММА. Концептуально СВЭП с ММА состоит из двух основных функциональных частей: силовой части (СЧ) и информационно-управляющей части (ИУЧ).

В свою очередь, СЧ может быть реализована также в виде двух основных вариантов: с «линейчатой» (рис. 1) или с «матричной» (рис. 2) архитектурой.

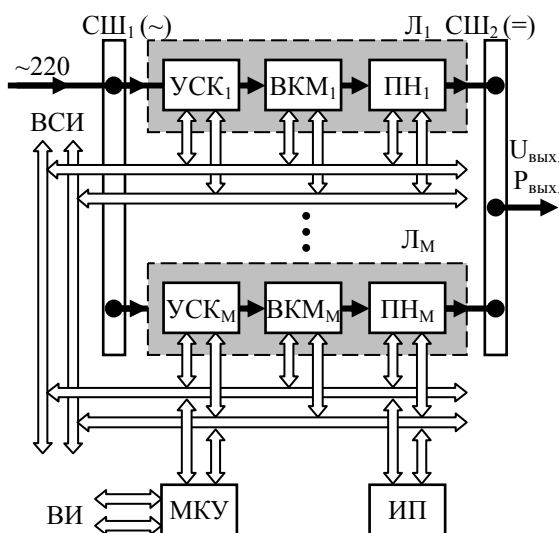


Рис. 1. СЧ СВЭП с «линейчатой» архитектурой

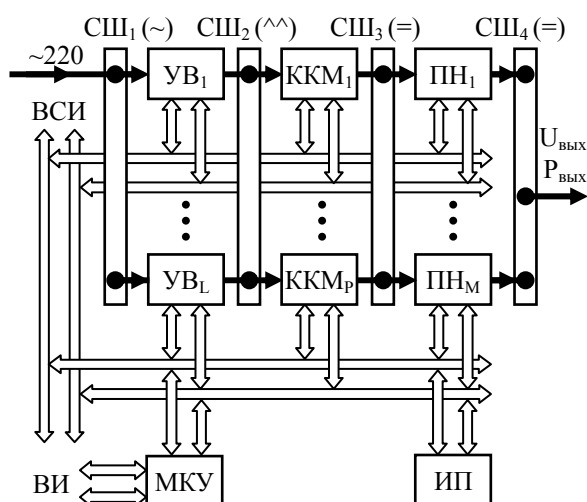


Рис. 2. СЧ СВЭП с «матричной» архитектурой

В первом варианте СЧ СВЭП содержит ряд однотипных и взаимонезависимых силовых каналов в виде «линейки» из последовательно соединенных компонентов – функциональных узлов (ФУ): управляемых силовых коммутаторов (УСК), выпрямителей переменного напряжения с активными корректорами коэффициента мощности (ВКМ) и преобразователей напряжения класса «DC-DC» (ПН). «Линейки» (Л) включены между двумя силовыми шинами (СШ) СВЭП: входной (СШ₁ переменного тока) и выходной (СШ₂ постоянного тока).

Жесткая привязка вышеперечисленных ФУ к «линейкам» является причиной основного недостатка такой СЧ – малоэффективного использования ее аппаратного ресурса, приводящего к удорожанию СВЭП и увеличению ее массогабаритных показателей. Так, при отказе в «линейке» ВКМ или ПН УСК отключает ее от входной шины СЧ, что практически не позволяет использовать ее работоспособные компоненты для функционирования СЧ в целом, так как требует для этого введения в нее значительного количества дополнительных УСК и усложнения ИУЧ наряду с ухудшением показателя безотказности СЧ (СВЭП).

Количество «линейки» (M) в СЧ определяется расчетным путем, учитывающим необходимость достижения заданных значений как выходной мощности СВЭП, так и показателя ее безотказности. Выходные компоненты «линейки» – ПН должны обеспечивать возможность суммирования значения их «единичных» выходных мощностей на общей выходной шине путем параллельной работы по

выходу, а также стабильность работы такой СЧ при различных динамических изменениях внешних параметров СВЭП.

Второй вариант реализации СЧ СВЭП избавлен от вышеупомянутого недостатка путем организации в СЧ двух дополнительных сечений (контуров): управляемых выпрямителей (УВ) и корректоров коэффициента мощности (ККМ), а также двух дополнительных силовых шин постоянного тока (СШ₂ и СШ₃, соответственно) в каждом из этих сечений.

Разделение ВКМ на УВ и ККМ позволяет исключить УСК из СЧ. С другой стороны, УВ и ККМ должны обеспечивать возможность их параллельной работы по выходу на вновь введенные шины постоянного тока. Если для УВ такой режим работы не является проблемным, то для реализации параллельной работы по выходу ККМ требуется проведение дополнительных исследований со значительной вероятностью повышения требований к ним.

Во втором варианте реализации СЧ в каждом ее сечении с однотипными ФУ возможно обеспечить независимое управление работой и контроль их технического состояния с помощью ИУЧ. Это особенно важно при введении в каждый контур СЧ необходимого количества резервных компонентов, не связанного численно с количеством таковых в других контурах и определяемого для каждого из них на основе расчета значения показателя безотказности СЧ (СВЭП).

Архитектура такой СЧ представляет собой «матрицу» из набора необходимых компонентов в ее столбцах и их количества в строках, что обеспечивает наиболее гибкое управление СЧ со стороны ИУЧ и значительно увеличивает эксплуатационные возможности СВЭП.

Возможна также реализация СЧ СВЭП с комбинированной архитектурой, в которой имеется два сечения: УВ и «укороченных линеек», в которых соединены последовательно ККМ и ПН. Выбор варианта СЧ СВЭП зависит, в основном, от наличия в распоряжении разработчика необходимых «системных» компонентов.

Более подробно назначение, области применения, варианты создания и потенциальные возможности СВЭП с ММА, а также технические требования к основным «системным» компонентам их СЧ приведены в [1–5].

ИУЧ для всех рассмотренных вариантов СВЭП с ММА имеет одинаковую архитектуру, основой которой являются модуль контроля и управления (МКУ), а также внутрисистемный (ВСИ) и внешний (ВИ) интерфейсы.

ВСИ предназначен для сопряжения основных компонентов СВЭП, а ВИ – для сопряжения СВЭП с внешними устройствами контроля и управления (ВУКУ).

С целью выполнения общей для СВЭП задачи – достижения высоких значений показателя безотказности – МКУ содержит основной и резервный информационно-управляющие каналы, а ВСИ и ВИ – продублированы.

Дополнительными компонентами ИУЧ являются информационные преобразователи (ИП) вида: «напряжение / напряжение», «ток / напряжение» и «температура / напряжение», обеспечивающие необходимую связь с МКУ через ВСИ.

Дальнейшее рассмотрение возможностей СВЭП с ММА, учитывая инвариантность данного вопроса, проведем для ее СЧ с «линейчатой» архитектурой как наиболее отработанной на данный момент времени.

Обеспечение параметрической многовариантности СВЭП с ММА. Наличие в составе СВЭП СЧ в виде совокупности однотипных и взаимонезависимых «линеек» с их условным делением на основные и резервные, а также наличие развитой и открытой ИУЧ способствуют обеспечению параметрической многовариантности СВЭП. Практически это осуществляется заменой исполнения МКУ как носителя версии программного обеспечения (ПО).

Для каждого исполнения (варианта) СВЭП в ПО устанавливается необходимое соотношение между количеством включенных и отключенных компонентов СЧ с применением режима их «ротации» в каждом цикле включения выходного напряжения СВЭП, что позволяет реализовать размен значения ее выходной мощности на значения ее показателей безотказности и (или) температуры окружающей среды, исходя из заданных условий эксплуатации.

Далее сделаем некоторые допущения, принципиально не искажающие суть рассматриваемого вопроса.

1. Выходные параметры электроэнергии, вырабатываемой СВЭП, формируются только совокупностью ПН, работающих параллельно на выходную шину.

2. Основным выходным параметром СВЭП в данном случае является значение ее выходной мощности. Остальные традиционные параметры СВЭП не имеют определяющего значения и поэтому не приводятся. Они могут быть конкретизированы в исполнениях СВЭП в зависимости от вариантов ее применения.

3. Из-за более низкого значения КПД ПН по сравнению со значениями КПД других компонентов СЧ тепловая мощность, рассеиваемая СВЭП ($P_{\text{расс.}}$), определяется суммарным тепловыделением всех включенных ПН.

В соответствии с принятыми выше допущениями основным компонентом СВЭП (СЧ, «линейки») для проведения последующего анализа возможности обеспечения параметрической многовариантности СВЭП является «единичный» ПН.

Исходя из этого, приведем несколько необходимых данных, характерных для реально создаваемой СВЭП:

- значение выходной мощности варианта СВЭП – $P_{\text{вых. СВЭП}} = 2\,000$ Вт;
- количество ПН в СВЭП – $M = 9$;
- номинальное значение выходной мощности «единичного» ПН – $P_{\text{вых. ПН}} = 600$ Вт;
- КПД «единичного» ПН – $\eta = 0,85$;
- коэффициент нагрузки по мощности «единичного» ПН – $K_p = 0,83$;
- способ резервирования, принятый в СВЭП – « $N+1+K$ »,

где N – количество ПН, необходимое для обеспечения значения выходной мощности СВЭП ($N = 4$); 1 – количество ПН, необходимое для обеспечения в СВЭП нагруженного резерва (при допущении однократного отказа «единичных» ПН); K – количество ПН, необходимое для обеспечения в СВЭП ненагруженного резерва, определенное расчетным путем и восстанавливающее, по мере необходимости, нагруженный резерв.

В основе обеспечения параметрической многовариантности (создания различных исполнений СВЭП) лежит вышеупомянутый принцип размена значения выходной мощности (с соответствующим ему значением мощности тепловыделения) на оцениваемый косвенным путем относительный уровень безотказности при допустимом фиксированном значении температуры корпусов «единичных» ПН, постоянно контролируемой с помощью ИП.

Возможность использования в данном случае косвенной оценки уровня безотказности вариантов СВЭП основана на очевидных фактах его прямой зависимости от снижения значения K_p «единичных» ПН, повышения эффективности использования режима ротации $N+1$ ПН при увеличении количества K ПН и от количества K ПН для увеличения продолжительности поддержания нагруженного резерва ПН. Сведения о возможностях различных вариантов СВЭП приведены в таблице.

Возможности различных вариантов СВЭП

| № вар. | $P_{\text{вых}}$ СВЭП, Вт | Количество ПН в СВЭП, шт. | | | K_p ПН | $P_{\text{расс}}$ СВЭП, Вт | Уровень безотказности СВЭП |
|--------|---------------------------|---------------------------|-------|-----|---------------|----------------------------|----------------------------|
| | | N | $N+1$ | K | | | |
| 1 | 5 400 | 9 | – | – | 1,00 | 950 | Предельно низкий |
| 2 | 5 000 | 9 | – | – | 0,93 | 880 | Низкий |
| 3 | 4 500 | 8 | 9 | – | 0,83 / 0,94 * | 795 | Пониженный |
| 4 | 4 000 | 7 | 8 | 1 | 0,83 / 0,95* | 705 | Ниже среднего |
| 5 | 3 500 | 6 | 7 | 2 | 0,83 / 0,97* | 620 | Средний |
| 6 | 3 000 | 5 | 6 | 3 | 0,83 / 1,00* | 530 | Выше среднего |
| 7 | 2 500 | 5 | 6 | 3 | 0,69 / 0,83* | 440 | Повышенный |
| 8 | 2 000 | 4 | 5 | 4 | 0,67 / 0,83* | 350 | Высокий |
| 9 | 1 500 | 3 | 4 | 5 | 0,63 / 0,83* | 265 | Очень высокий |

В таблице, кроме вышеприведенных исходных данных, представлены также значения $P_{\text{расс}}$, соответствующие значениям $P_{\text{вых}}$ различных вариантов СВЭП, и позволяющие провести косвенную относительную оценку теплового режима работы различных вариантов СВЭП, а также значения K_p ПН, в том числе при граничном (минимально допустимом) количестве N работоспособных ПН в варианте СВЭП (отмечены символом *).

Количественная сравнительная оценка значений показателей безотказности различных вариантов СВЭП с ММА по отношению к СВЭП в традиционном исполнении предполагает учет некоторых особенностей и из-за значительного объема материала не является предметом настоящей статьи.

Результаты рассмотрения возможностей различных вариантов СВЭП. Данные таблицы могут быть использованы для:

- демонстрации тенденции последовательного размена значения $P_{\text{вых}}$ СВЭП на значения показателей безотказности и температуры окружающей среды;
- выявления граничных возможностей применения СВЭП;
- определения наиболее приемлемого диапазона вариантов применения СВЭП;
- определения базового варианта СВЭП.

Первый аспект очевиден из анализа данных, представленных в таблице.

Граничными возможностями применения СВЭП можно считать варианты №1 и №9. Вариант №1 требует значительных усилий для обеспечения приемлемой для СВЭП температуры окружающей среды и функционирует на предельно низком уровне безотказности (до отказа одного из M ПН).

Вариант №9 может обеспечить очень высокое значение показателя безотказности СВЭП и значительно увеличить верхнюю границу температурного диапазона работы. Однако применение СВЭП со значением $P_{\text{вых}} = 1500$ Вт относительно ее реально достижимых массогабаритных показателей «уводит» данный вариант СВЭП в область экзотики.

Наиболее приемлемым для большинства случаев эксплуатации СВЭП может быть диапазон вариантов №4–8, в которых появляется возможность практического повышения значения показателя безотказности за счет применения способа резервирования ПН « $N+1+K$ » и их «ротации».

В качестве базового варианта СВЭП целесообразно выбрать вариант №8, позволяющий за счет внутренних аппаратных ресурсов одновременно обеспечивать приемлемые условия эксплуатации и высокое значение показателя безотказности.

Наличие в СВЭП ММА с вышеизложенными принципами реализации СЧ и ИУЧ позволяет отнести данную СВЭП к классу интеллектуальных адаптивных систем. Так, кроме рассмотренной выше адаптации к отказам отдельных компонентов СЧ и ИУЧ, возможна адаптация СВЭП к отказам отдельных «единичных» вентиляторов в распределенной системе воздушного охлаждения, входящей в состав СВЭП. Адаптация реализуется путем перераспределения нагрузки между M исправных ПН, разнесенных в объеме корпуса СВЭП, исходя из данных о значениях температуры корпуса каждого из ПН и температуры окружающей среды.

Возможна также адаптация СВЭП к стационарным (длительным) изменениям тока нагрузки путем реструктуризации СЧ за счет отключения избыточных в этот период времени ПН (изменения количества $N+1$) с изменением ротации и перестройкой порогов срабатывания защит (от перегрузки по току и тепловой).

При разработке и изготовлении СВЭП с ММА, а в дальнейшем и эксплуатации (включая регламентно-восстановительные работы и ремонт), необходимо также попутное создание обеспечивающей технологической аппаратуры. Наиболее приемлемым для такой СВЭП является принцип ее реализации в виде различных технологических программно-аппаратных платформ: технологическая платформа магистралей связи (ТПМС), технологическая силовая платформа (ТСП), системная технологическая платформа (СТП) [5, 6].

ТПМС предназначена для решения большого перечня задач до и в процессе разработки структуры, схемотехники и выбора элементной базы компонентов ИУЧ и узлов сопряжения компонентов СЧ, а также информационных каналов связи между ними, для предварительной отработки алгоритмов и ПО, а также для наладки МКУ во взаимодействии с абонентами ВСИ и ВИ.

ТСП позволяет решить основные задачи при создании СЧ: обеспечение параллельной работы ПН, их резервирование способами « $N+1$ » и « $N+1+K$ », обеспечение динамической устойчивости работы СВЭП.

СТП предназначена для отладки СВЭП в целом с имитацией отказов основных компонентов последней и возможностью взаимосвязанного определения значения показателя безотказности, а также с имитацией связи с ВУКУ и аналогичными СВЭП для решения задач их агрегатирования.

Для обеспечения динамической устойчивости работы СВЭП с ММА требуется также создание целевой САПР [7], что реализуется в настоящее время (САПР «Dynamic CAD»). На основании полученных при моделировании массивов данных и синтеза параметров СВЭП САПР обеспечивает определение в пространстве параметров областей существования различных динамических режимов ее функционирования, обеспечивающих необходимую степень живучести.

Литература

1. Колосов В.А. Проблемы создания современных систем вторичного электропитания РЭА / В.А. Колосов, Ю.Н. Либенко // Электрическое питание (СПб). – 2007. – № 7. – С. 14–20.
2. Колосов В.А. СВЭП с повышенной надежностью для формирования промежуточных напряжений электропитания РЭА / В.А. Колосов, Ю.Н. Либенко // Электропитание. – 2009. – № 1. – С. 8–12.
3. Либенко Ю.Н. Состояние разработки электронных модулей для СВЭП с магистрально-модульной архитектурой / Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Электропитание. – 2009. – № 4. – С. 17–19.
4. Колосов В.А. Вопросы организации СВЭП, влияющие на создание силовых электронных модулей / В.А. Колосов, Ю.Н. Либенко // Электропитание. – 2010. – № 1. – С. 4–8.
5. Либенко Ю.Н. Технологические платформы для СВЭП с магистрально-модульной архитектурой. Технологическая платформа магистралей связи (ТПМС) / Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Электропитание. – 2009. – № 4. – С. 50–53; – 2010. – № 1. – С. 58–61.
6. Либенко Ю.Н. Технологические платформы для СВЭП с магистрально-модульной архитектурой. Технологическая силовая платформа (ТСП) / Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Электропитание. – 2010. – № 2. – С. 52–54; 2010. – № 4. – С. 57–59.
7. Михальченко Г.Я. Динамические режимы источников питания модульного типа / Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, А.А. Гаврилов // Электропитание. – 2010. – № 4. – С. 35–42.

Либенко Юрий Николаевич

Главный специалист НТЦ-4 ОАО «НИИВК им. М.А. Карцева», г. Москва
Тел.: (495) 330-15-38
Эл. почта: lib7636@rambler.ru

Михальченко Геннадий Яковлевич

Директор НИИ промышленной электроники ТУСУРа, д.т.н., профессор
Тел.: (382-2) 41-32-32
Эл. почта: kre-tusur@yandex.ru

Четин Андрей Николаевич

Аспирант, ст. инженер НТЦ-4 ОАО «НИИВК им. М.А. Карцева»
Тел.: (495) 330-15-38
Эл. почта: chetinandrew@yandex.ru

Libenko Yu.N., Mikhailchenko G.Ya., Chetin A.N.

Specific potentialities of power-supply systems with dataway-modular architecture

The article considers the development conception of intelligence power-supply systems with dataway-modular architecture which provides parametric multichoice ability and adaptability to either inner or external different working conditions.

Keywords: power-supply system, dataway-modular architecture, redundancy, reliability, parametric multichoice ability.