

Ю. А. Шиняков

СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрены способы управления энергопреобразующими устройствами систем электроснабжения автоматических космических аппаратов, обеспечивающие повышенную стабильность выходного напряжения и тока, а также возможность параллельной работы бортовых источников энергии.

Система электроснабжения (СЭС) автоматических космических аппаратов (КА) включает первичные и буферные источники энергии, обладающие различными эксплуатационными характеристиками, энергопреобразующие устройства (ЭПУ) и блоки автоматики (БА), обеспечивающие коммутацию силовых шин, исполнение команд, контроль параметров и автоматическое изменение режимов функционирования СЭС. В качестве первичных источников энергии наибольшее применение находят солнечные батареи (СБ), а в качестве накопителей энергии для питания бортовой аппаратуры на теневых участках орбиты, затенения панелей СБ и при пиковых нагрузках обычно используются аккумуляторные батареи (АБ).

Регулирование потоков энергии в СЭС осуществляется энергопреобразующими устройствами, которые должны обеспечивать заданное качество электропитания на выходных шинах СЭС и оптимальные режимы работы источников энергии в течение всего времени работы КА. Функционально их можно разделить на три основные группы: зарядные устройства (ЗУ), разрядные устройства (РУ) и регуляторы напряжения (РН), обеспечивающие при избытке энергии, генерируемой СБ, стабилизацию напряжения на выходных шинах, а при недостатке (режим разряда АБ) – регулирование напряжения СБ [1].

Конкретное схемотехническое исполнение ЭПУ каждой группы определяется целевыми функциями и соотношением напряжений СБ, АБ и нагрузки. Функции преобразователей не являются жестко фиксированными и постоянными. В зависимости от текущего состояния системы, внешних воздействий, внутренних параметров изменяются режимы работы преобразователей: преобразователи переходят из режима стабилизации входного или выходного напряжения в режим регулирования входного или выходного тока (распределения или ограничения токов источников энергии и нагрузки) и режим регулирования входной или выходной мощности (оптимизации режимов работы и восстановления характеристик источников энергии, аварийных режимов работы СЭС). Поэтому для управления ЭПУ используются различные принципы и способы управления: по отклонению, по возмущению, программное, следящее, экстремальное, адаптивное и т. д.

Основной частью силовых энергопреобразующих устройств являются импульсные преобразователи. Они обеспечивают выполнение таких требований, как качество электроэнергии, высокие удельные характеристики, реализуют режимы функционирования СЭС с оптимальным использованием источников энергии и т. д. Для управления ключевыми элементами ЭПУ используется способ широтно-импульсной модуляции (ШИМ), обеспечивающий лучшие возможности для решения задачи электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры КА, поскольку частота пульсаций выходного напряжения системы электроснабжения в этом случае постоянна и не зависит от входного напряжения и тока нагрузки.

Синтез СЭС с требуемыми статическими и динамическими характеристиками, необходимой устойчивостью во всех режимах работы и при всех условиях эксплуатации – сложная комплексная задача. Ее решение возможно только на системном уровне, при выборе и использовании подходящих способов управления, позволяющих оптимизировать использование энергии источников, входящих в систему электроснабжения, с наименьшими потерями преобразовывать эту энергию к виду, пригодному для питания потребителей, и обеспечивать адекватную реакцию системы на все виды возмущающих воздействий.

Организация требуемой последовательности работы источников энергии и их эффективного использования достигается за счет применения зонного принципа регулирования входных и выходных напряжений СЭС, основанного на регулировании напряжения СБ зарядными устройствами и РН и двухподдиапазонной стабилизации выходного напряжения разрядными устройствами и регуляторами напряжения. Этот принцип обеспечивает автономность функционирования и адаптацию СЭС к деградации ее элементов под воздействием эксплуатационных факторов в течение длительного срока активного функционирования [1; 2].

Ширина каждого поддиапазона определяется статической ошибкой регулирования ШИМ конкретного устройства. Расстояние между поддиапазонами стабилизации выходного напряжения СЭС, обеспечиваемое устройствами РН и РУ, должно гарантировать недопустимость наложе-

ния поддиапазонов регулирования при максимальных температурных изменениях и деградации опорных элементов ШИМ регуляторов напряжения и разрядных устройств, воздействию других внешних и внутренних факторов (изменении параметров СБ, АБ и нагрузки).

При построении системы электроснабжения с большим количеством энергопреобразующих устройств, осуществляющих регулирование напряжения в собственных поддиапазонах, общий диапазон его изменения станет недопустимо большим. Решением данной проблемы может быть разработка методов уменьшения статической ошибки регулирования ШИМ.

Простейший способ достижения этого – повышение коэффициента передачи усилителя сигнала ошибки (УО) ШИМ. Однако повышение общего коэффициента усиления, как правило, приводит к приближению системы к колебательной границе устойчивости. Задача повышения запаса устойчивости системы регулирования решается введением в нее дополнительных корректирующих звеньев, представляющих собой динамические звенья с определенными передаточными функциями [3]. Обычно для этих целей используются звенья частотной коррекции усилителя ошибок. Но при частотной коррекции усилителя ширина его полосы пропускания обратно пропорциональна коэффициенту усиления. И компромисс между устойчивостью, частотными свойствами и заданным коэффициентом усиления может быть трудно достижимым.

Существенно повысить точность стабилизации напряжения за счет возрастания коэффициента передачи обратной связи (ОС) в области низких частот возможно при введении в схему управления ЭПУ астатического корректирующего звена [4].

Кроме того, для повышения статической и динамической точности стабилизации напряжения энергопреобразующих устройств используются методы теории инвариантности. Широко известны схемы компенсационно-параметрических импульсных стабилизаторов, в которых, кроме основного замкнутого контура регулирования по отклонению выходного напряжения, используется контур регулирования по основному возмущению – неустойчивости входного напряжения. Однако для различных типов импульсных стабилизаторов и различных режимов их работы условия компенсации возмущения имеют различный вид.

Значительно улучшить статические характеристики позволяет способ управления ЭПУ с компенсацией статической ошибки демодулированным сигналом ШИМ (рис. 1) [5]. С сигналом рассогласования суммируется сигнал коррекции $U_k(1 - K_3)$, полученный в результате демодуляции ШИМ-сигнала управления регулирующим элементом. Для данной схемы (см. рис. 1) справедливы следующие выражения для коэффициента заполнения и сигнала рассогласования:

$$K_3 = 1 - (U_{o.c} - U_{оп}) / U_{пил}(1 - K_3 U_k / U_{пил}),$$

$$U_{o.c} - U_{оп} = (1 - K_3) (U_{пил} - K_k U_k),$$

где K_k – коэффициент передачи демодулированного ШИМ-сигнала. Изменяя K_k , можно корректировать величину статической ошибки регулирования.

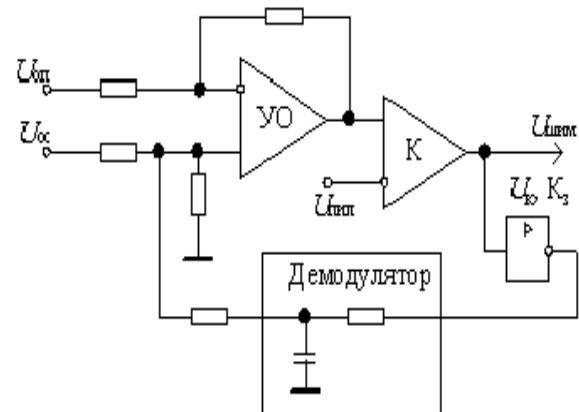


Рис. 1. ШИМ с компенсацией статической ошибки регулирования демодулированным сигналом управления

Данный способ компенсации статической ошибки можно использовать для преобразователей различного типа. Его важной особенностью является то, что он применим только в замкнутой системе регулирования. Однако при этом удастся отслеживание и компенсацию изменения нескольких дестабилизирующих факторов (таких, как входное напряжение, сопротивление нагрузки) свести к контролю одного параметра – коэффициента заполнения ШИМ – с формированием соответствующих корректирующих воздействий на усилитель сигнала ошибки. Немаловажно и то, что при этом нет необходимости в большом коэффициенте передачи усилителя сигнала ошибки по низкой частоте, что положительно влияет на его устойчивость и рабочую полосу частот.

Представим схему управления работой системы электроснабжения, реализующую зонный принцип регулирования ШИМ и содержащую астатическое звено в усилителе рассогласования А1 (рис. 2).

Выходное напряжение СЭС задается значением опорного напряжения $U_{оп}$. Благодаря высокому коэффициенту усиления усилителя А1 сигнал на его выходе изменяется в широком диапазоне при малых изменениях сигнала рассогласования. Выходное напряжение усилителя А1 поступает на входы усилителей А2 и А3, выполняющих задачу разбиения диапазона изменения выходного напряжения А1 (и, следовательно, выходного напряжения СЭС) на поддиапазоны регулирования РУ и РН. Расположение этих поддиапазонов определяется значениями $U_{оп.ру}$ и $U_{оп.р.н}$. Кроме того, усилители А2 и А3 содержат активные форсирующие звенья для передачи резких изменений выходного напряжения СЭС. Таким образом,

схема (см. рис. 2) обеспечивает высокую точность стабилизации выходного напряжения системы электросбережения при возможности работы нескольких ЭПУ по заданному алгоритму, определяемому зонным принципом.

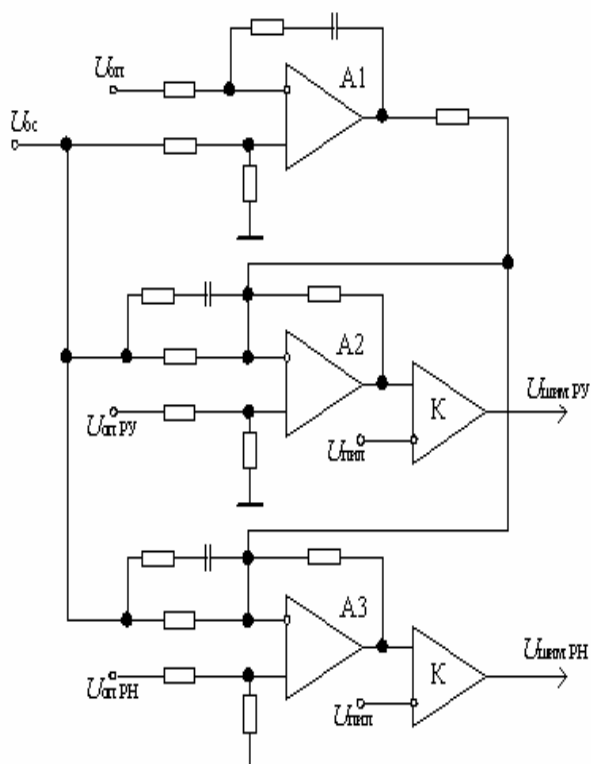


Рис. 2. Схема управления СЭС с использованием астатического звена в усилителе рассогласования

Такой способ широко применяется в случае, когда возможно разделение допустимого диапазона изменения регулируемого параметра на рабочие поддиапазоны, определенные для каждого устройства. Однако при построении СЭС по разветвленной схеме с секционированной солнечной батареей, имеющей большое количество ЭПУ, которое осуществляют последовательное регулирование выходного напряжения в собственных поддиапазонах, обеспечение недопущения наложения поддиапазонов регулирования для всех возможных режимов и условий эксплуатации может оказаться затруднительным.

Последовательную работу энергопреобразующего устройства без увеличения диапазона регулирования выходного напряжения обеспечивает способ управления СЭС с динамическим смещением уровней регулирования ЭПУ (рис. 3). При этом обеспечивается работа преобразователя одной секции СБ в режиме ШИМ, а преобразователей остальных секций – в полностью открытом или закрытом состоянии.

Данный способ управления обеспечивает последовательную работу силовых устройств за счет организации взаимного воздействия устройств управления преобразователями. Сигналы, осуществляющие это воздействие, получают пу-

тем демодуляции прямого и инверсного широтно-модулированных сигналов управления преобразователями. При этом демодулированные прямой и инверсный сигналы управления i -м преобразователем смещают уровень регулирования $(i + 1)$ -го преобразователя в сторону повышения, а уровень регулирования $(i - 1)$ -го преобразователя – в сторону понижения.

Таким образом, при изменении внешних воздействующих факторов происходит автоматическое подключение к выходу системы нужного количества источников энергии, осуществляемое при автоматическом выборе регулирующего канала. При этом нет необходимости в разделении допустимого диапазона изменения выходного напряжения на поддиапазоны регулирования, т. е. преобразователи всех каналов настраиваются и работают с одним уровнем стабилизируемого напряжения, определяемым $U_{оп}$.

Рассмотренные выше способы управления обеспечивают возможность организации работы источников энергии СЭС в нужной последовательности, используя контур обратной связи по напряжению. В то же время, как уже отмечалось, алгоритмы функционирования систем электроснабжения предусматривают не только последовательную, но и параллельную работу источников энергии. При этом к системе электроснабжения предъявляются требования по распределению токов между источниками в заданных соотношениях и по их ограничению на заданном уровне для оптимизации режимов функционирования и защиты всех элементов данной системы. Кроме того, ЭПУ достаточно мощного источника энергии обычно выполняется путем параллельного включения нескольких менее мощных преобразующих модулей, в связи с чем ставится задача равномерного распределения токов между ними. Для этих целей используются контуры обратной связи по току.

Известен ряд способов выравнивания токов между энергопреобразующими устройствами, подключенными к разным источникам энергии, но имеющими одинаковые значения опорного напряжения и охваченными общей отрицательной обратной связью (ООС) по напряжению. Это способы с местной ООС по току, с параметрической ООС, с ООС по отклонению тока от среднего значения и с ООС по отклонению тока от максимального значения [6; 7].

При выборе способа выравнивания токов следует принимать во внимание степень его влияния на точность стабилизации выходного напряжения системы с учетом конкретного варианта построения схемы управления ЭПУ.

Под местной отрицательной обратной связью по току подразумевается корректирующее воздействие, уменьшающее длительность открытого состояния силовых ключей энергопреобразующе-

го устройства с ростом протекающего тока. Практически это сводится к введению такого воздействия на усилитель рассогласования, которое понижает уровень выходного напряжения, стабилизируемого данным ЭПУ. Как было отмечено выше, все параллельно работающие ЭПУ имеют

одинаковые опорные напряжения и общее напряжение обратной связи, поэтому силовые ключи этого устройства прикрываются. Устойчивое состояние системы характеризуется выравниванием воздействия на усилители рассогласования всех ЭПУ, что означает и выравнивание токов.

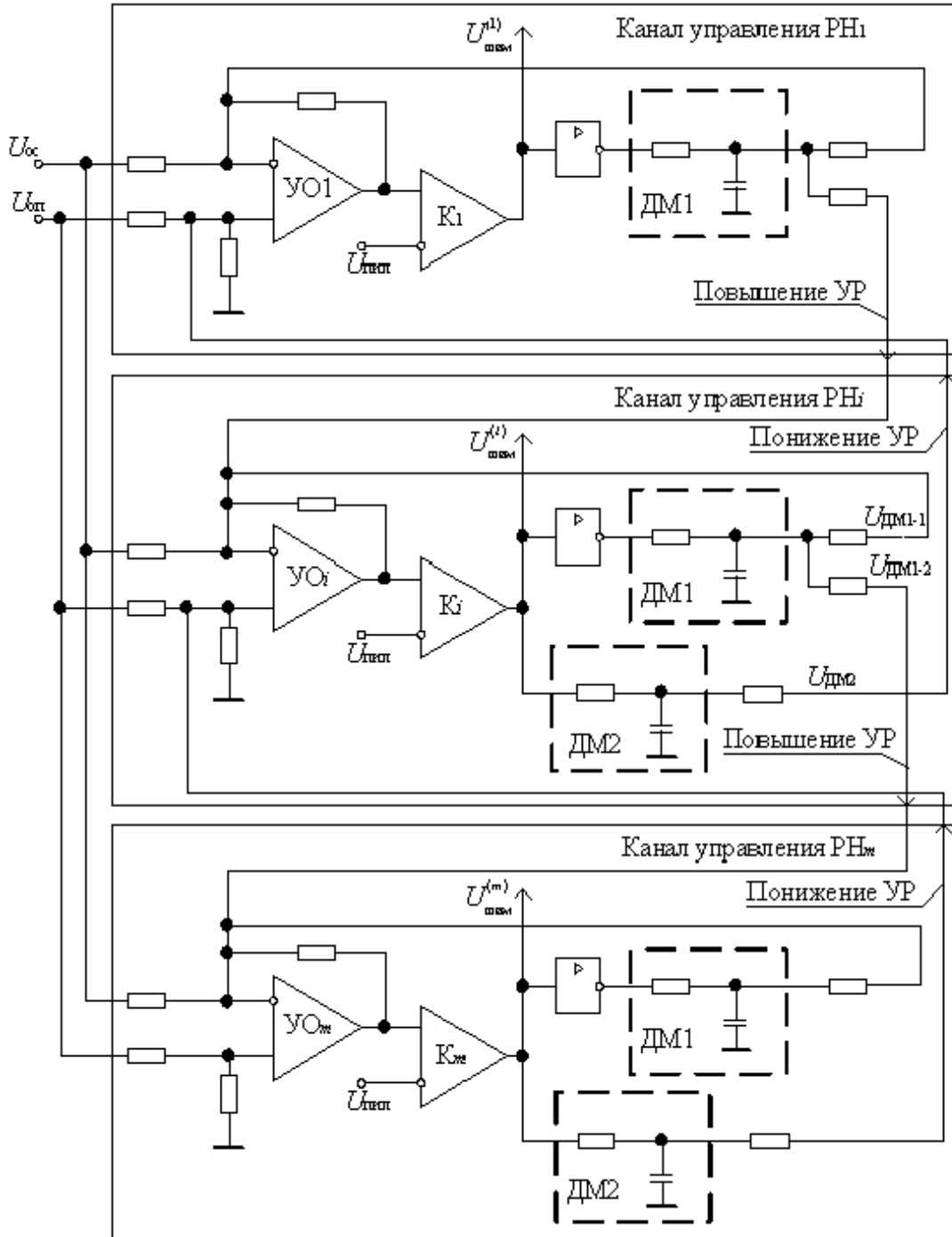


Рис. 3. Структура построения устройства управления ЭПУ с отдельным регулированием энергии m секций СБ с помощью преобразователей $RH_1 \dots RH_m$

Недостаток данного способа очевиден и заключается в существенно падающей внешней характеристике системы. Однако в случае если снижение выходного напряжения в результате действия местной ООС по току укладывается в

заданные рамки из-за наличия сильной обратной связи по напряжению (например, с астатическим корректирующим звеном), этот способ становится достаточно привлекательным, в первую очередь ввиду отсутствия перекрестных связей между

ЭПУ. Поэтому его использование целесообразно при распределении токов между параллельно работающими силовыми каналами одного энергопреобразующего устройства.

Способ выравнивания токов с ООС по отклонению тока от заданного значения предполагает наличие ведущего ЭПУ, осуществляющего стабилизацию напряжения на выходе системы и задающего значение тока, которое с определенной точностью повторяют ведомые ЭПУ (рис. 4). Разделение ЭПУ на ведущие и ведомые может быть задано жестко, но тогда возникает проблема обеспечения нормальной работы системы при отказе ведущего ЭПУ. Более целесообразен способ управления, когда ведущий ЭПУ выбирается автоматически исходя из критерия наибольшего тока [7]. В этом случае отказ ведущего устройства приводит лишь к тому, что его функции начинает выполнять другое ЭПУ согласно принятому критерию.

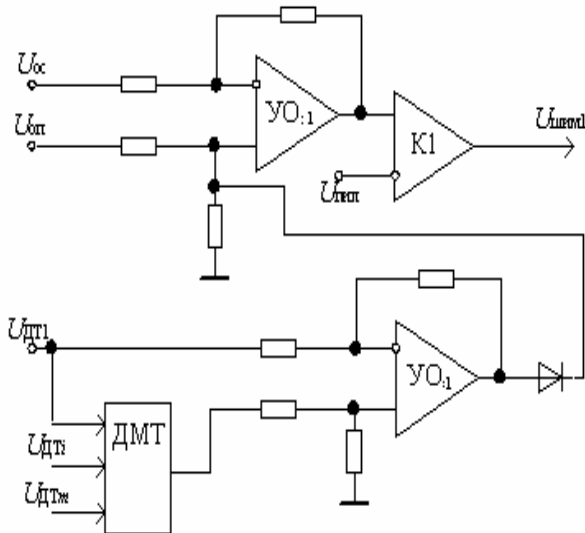


Рис. 4. Схема управления ЭПУ (условно обозначенного номером 1) с ООС по отклонению тока от заданного значения, входящего в состав системы из m ЭПУ

Уровень напряжения, стабилизируемого ЭПУ, определяется опорным напряжением $U_{оп}$ и напряжением смещения, поступающим от усилителя ошибки регулирования тока $УО_{11}$. С помощью $УО_{11}$ сигнал $U_{о.м1}$, пропорциональный току данного ЭПУ, сравнивается с сигналом, пропорциональным наибольшему из токов всех ЭПУ, входящих в систему. Этот сигнал формируется детектором максимального тока (ДМТ) в результате обработки информации с m датчиков тока.

В случае если ток данного ЭПУ максимален, входные сигналы усилителя $УО_{11}$ оказываются равными, т. е. его выходной сигнал равен нулю и не влияет на контур регулирования напряжения. Этот ЭПУ является ведущим и осуществляет ста-

билизацию напряжения на уровне, определяемом $U_{оп}$.

Если наибольший ток протекает через какой-либо из $2...m$ ЭПУ, то на выходе усилителя $УО_{11}$ появляется сигнал, воздействующий на усилитель ошибки регулирования напряжения $УО_{U1}$ таким образом, что уровень стабилизации повышается. Это приводит к увеличению тока через ЭПУ. В результате токи всех энергопреобразующих устройств системы выравниваются.

Отклонение тока i -го ЭПУ от тока ведущего ЭПУ определяется по формуле

$$\Delta I_i = U_{ш.и.м} \Delta S_i / (1 + R_{дт} K_I S_i),$$

где $U_{ш.и.м}$ – управляющее напряжение на входе регулирующего элемента ЭПУ; S_i – статическая крутизна выходной характеристики ЭПУ, $S_i = I_i / U_{ш.и.м}$; $R_{д.м}$ – сопротивление измерительного датчика тока; K_I – коэффициент передачи токовой обратной связи.

Построение систем управления, обеспечивающих ограничение тока ЭПУ на заданном уровне, возможно за счет как параллельного, так и последовательного включения регуляторов (усилителей рассогласования) по напряжению и току. Система с последовательным соединением регуляторов имеет существенную зависимость характеристик от параметров корректирующих элементов, стоящих одновременно как в цепи обратной связи по току, так и в цепи обратной связи по напряжению. Поэтому предпочтительнее использовать параллельное соединение регуляторов по напряжению и току, обеспечивающее лучшее быстродействие, так как сигнал обратной связи по току не проходит инерционные цепи обратной связи по напряжению [1].

Существенно повысить точность ограничения выходного тока ЭПУ позволяет способ управления импульсным преобразователем постоянного напряжения со стабилизацией предельного тока [8], снижающий погрешности стабилизации выходного тока преобразователя в случае, когда выходной ток достигает заданного предельного значения и преобразователь переходит из режима стабилизации напряжения в режим стабилизации тока. Этот результат достигается тем, что выходной ШИМ-сигнал управления регулирующим элементом преобразователя получается в результате конъюнкции двух ШИМ-сигналов, первый из которых формируется на основе сигнала рассогласования по напряжению, а второй – на основе сигнала рассогласования по току. При этом уровень сигнала рассогласования по току корректируется в зависимости от значения демодулированного выходного ШИМ-сигнала управления регулирующим элементом.

Помимо цепей обратной связи по току и напряжению, СЭС может содержать контуры регу-

лирования, предназначенные для выполнения ряда специальных функций: экстремального регулирования мощности СБ [9], реализации аварийных и восстановительных режимов работы АБ [10] и др. Механизм реализации всех этих функций сводится к введению дополнительных корректирующих воздействий на усилители рассогласования напряжения или тока в соответствии с заданными алгоритмами.

Таким образом, способы управления, рассмотренные в данной статье, используются в системе электроснабжения целого ряда космических аппаратов, как эксплуатирующихся, так и находящихся на стадии разработки. Требуемое значение стабильности обеспечивает способ управления СЭС с использованием астатического звена в усилителе рассогласования. Распределение токов между параллельно работающими силовыми каналами одного ЭПУ, как правило, реализуется за счет применения местной отрицательной обратной связи по току. При распределении токов и мощности между буферными источниками энергии (аккумуляторными батареями) наиболее целесообразен способ с ООС по отклонению тока от максимального значения. Достижение требуемой точности ограничения токов заряда-разряда АБ значительно облегчает предложенный автором способ управления со стабилизацией предельного тока. А способ управления с динамическим смещением уровней регулирования энергопреобразующего устройства может быть применен при разработке перспективной высоковольтной СЭС с секционированной солнечной батареей, предназначенной для космических аппаратов с повышенным (100 ± 1 В) бортовым напряжением.

Библиографический список

1. Системы электропитания космических аппаратов / Б. П. Соустин, В. И. Иванчура, А. И. Чернышев, Ш. Н. Ислаев. Новосибирск : Наука. Сиб. изд. фирма, 1994. 318 с.

2. Пат. 2035109 Российская Федерация, МКИ⁶ Н 02 J 7 / 35. Автономная система электроснабжения / А. И. Чернышев, Ю. А. Шиняков, К. Г. Гордеев и др. // Изобретения. 1995. № 13.

3. Бесекерский, В. А. Теория систем автономного регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. М. : Наука, 1975. 767 с.

4. Мелешин, В. И. Формирование динамических свойств устройств вторичного электропитания с ШИМ-2 / В. И. Мелешин, В. В. Мосин, Ю. Ф. Опадчий // Электрон. техника в автоматике. 1985. Вып. 16. С. 5–44.

5. Пат. 2254606 Российская Федерация, МПК⁷ G 05 F 1 / 56. Способ управления импульсным стабилизатором постоянного напряжения / К. Г. Гордеев, С. П. Черданцев, Ю. А. Шиняков // Изобретения. 2005. № 17.

6. Конев, Ю. И. Транзисторные сумматоры мощности в системах параллельной работы источников питания / Ю. И. Конев, А. И. Юрченко, С. С. Букреев // Электрон. техника в автоматике. 1980. Вып. 11. С. 48–55.

7. А. с. 1206763 СССР, МКИ⁴ G 05 F 1 / 59. Многоканальная система электропитания с равномерным токораспределением / К. Г. Гордеев, Ю. А. Шиняков, С. П. Черданцев, В. О. Эльман // Открытия. Изобретения. 1986. № 3.

8. Пат. 2249842 Российская Федерация, МПК⁷ G 05 F 1 / 10, 1 / 66. Способ управления импульсным преобразователем постоянного напряжения со стабилизацией предельного тока / К. Г. Гордеев, С. П. Черданцев, Ю. А. Шиняков, К. В. Тараканов // Изобретения. 2005. № 10.

9. Пат. 2101831 Российская Федерация, МКИ⁶ Н 02 J 7 / 35. Система электропитания с экстремальным регулированием мощности фотоэлектрической батареи / К. Г. Гордеев, С. П. Черданцев, Ю. А. Шиняков // Изобретения. 1998. № 1.

10. Пат. 2168828 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 J 7 / 36. Способ управления автономной системой электроснабжения / К. Г. Гордеев, С. П. Черданцев, Ю. А. Шиняков и др. // Изобретения. 2001. № 16.

Yu. A. Shinjakov

CONTROL METHODS OF ENERGY CONVERSION DEVICES IN THE POWER SUPPLY SYSTEMS OF AUTOMATIC SPACE VEHICLES

It is considered control methods of energy conversion devices in the power supply systems of automatic space vehicles, which provide enhanced stability of output voltage and current, and also a possibility of the parallel operation of onboard power supplies.