

УДК 621.311

КОРРЕКЦИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПЕДАНСА ВЫХОДНОЙ ШИНЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Д.Ф. Дементьев, Ю.М. Казанцев

Томский политехнический университет
ОАО «Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск

Исследуется зависимость амплитудно-частотной характеристики выходного импеданса системы электропитания космических аппаратов от типа регулятора, частоты преобразования, количества фаз преобразователей. Предложены закон управления импульсным стабилизатором напряжения и способы минимизации импеданса, включающие повышение частоты коммутации ключевых элементов, применение многофазного преобразования и равномерного токораспределения между фазами, увеличение емкости конденсаторов выходного фильтра.

Ключевые слова:

Импульсный стабилизатор напряжения, регулятор, многофазный режим, токораспределение, импеданс, биения, устойчивость.

Key words:

Switching voltage regulator, controller, multiphase mode, current sharing, impedance, beats, stability.

В состав современных систем электропитания (СЭП) космических аппаратов входят первичный источник, накопитель и энергопреобразующая аппаратура, обеспечивающая передачу энергии от первичного источника и накопителя на выход СЭП, восстановление ее в накопителе и требуемое качество выходного напряжения. В качестве первичного источника широко применяются солнечные батареи, а накопителями, как правило, служат химические источники тока – аккумуляторные батареи. Передача энергии от первичного источника и накопителя на выход СЭП и стабилизация напряжения на нем осуществляются импульсными стабилизаторами напряжения (ИСН).

Рост количества задач, решаемых космическими аппаратами, приводит к увеличению числа и мощности потребителей. Для повышения мощности и надежности энергопреобразующей аппаратуры необходимо параллельное объединение ИСН. При этом, нагрузка должна распределяться между их силовыми каналами равномерно. Целесообразно осуществлять многофазный режим работы преобразователя, при котором силовые ключи группы параллельных ИСН коммутируются с взаимным сдвигом, равным T/N , где T – период следования импульсов, N – число ИСН. Многофазные преобразователи обеспечивают снижение уровня пульсаций входных и выходных напряжений и токов СЭП, распределение теплового рассеяния, снижение уровня радиопомех. Кроме того, при равномерном распределении тока в N раз повышается эффективная частота регулирования преобразователя [1].

Объединение источников, преобразователей и потребителей в единый энергетический и конструктивный комплекс часто сопровождается потерей устойчивости СЭП, в то время как каждый из них стабильно работает в автономном режиме во всем диапазоне изменения входных и выходных параметров. Рост пульсаций выходного напряже-

ния и нарушение электромагнитной совместимости СЭП выявляются в основном на стадии комплексных испытаний.

На практике для анализа устойчивости сопоставляют входные и выходные характеристики системы «преобразователь – потребитель». Для стабильной ее работы модуль входного импеданса потребителей должен быть больше модуля выходного импеданса регулируемой шины СЭП во всем диапазоне частот. Если на каких-либо частотах эти значения равны или близки друг к другу, дополнительно сравнивают фазы импедансов. В устойчивых системах разность этих фаз не должна приближаться к значению $\pm 180^\circ$ ближе, чем на 40° . Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) импеданса также является показателем кондуктивной электромагнитной совместимости. Необходимость уменьшения модуля выходного импеданса СЭП обусловлена увеличением не только суммарной мощности потребителей, но и доли потребителей с вторичными источниками питания.

Таким образом, исследуется техническая устойчивость СЭП при ограниченных возмущениях, которым должны соответствовать лишь малые отклонения от положения равновесия, оцениваемые значением выходного импеданса.

Измерение импеданса преобразующего оборудования осуществляется при помощи тест-сигнала, являющегося имитацией возмущения тока нагрузки с переменной составляющей, частота и амплитуда которой варьируются в соответствии с системными требованиями [2].

Стандартом питания Европейского космического агентства требование к импедансам СЭП и потребителей задается через их соотношение [3]. Отечественные предприятия-изготовители спутников связи также предъявляют схожие требования, предъявляемые к выходному импедансу СЭП, причем эти требования могут задаваться не только в зависимости от номинального выходного напряже-

жения СЭП и мощности потребителей, но и с учетом реактивных параметров и специфики нагрузок конкретного космического аппарата, а также сеансного расписания коммутаций [4].

Основными факторами, формирующими АЧХ импеданса регулируемой шины СЭП, являются:

- тип и параметры регулятора. Для регуляторов, используемых в импульсных стабилизаторах напряжения, характерны инерция, фазовые сдвиги и своя полоса пропускания, обуславливающие искажения при формировании управляющих воздействий. У быстродействующего регулятора полоса пропускания шире и фазовые сдвиги в сигналах ошибки минимальны;
- частота преобразования. Поскольку ИСН является дискретной динамической системой, то для того, чтобы отработать синусоидальное возмущение, динамической системе управления (СУ) нужно, в соответствии с теоремой Котельникова, более двух (практически 4–5) моментов управления на периоде этого возмущения, т. е. должно выполняться условие $f_{\text{п}} \geq 4f_{\text{в}}$, где $f_{\text{п}}$ – частота преобразования; $f_{\text{в}}$ – частота возмущения. Таким образом, предельная граница полосы пропускания регулятора в дискретной системе определяется количеством моментов управления на периоде возмущения. Одним из способов увеличения количества моментов управления является многофазная параллельная работа группы ИСН, при этом эквивалентная частота преобразования $f_{\text{п}} = Nf_{\text{п}}$;

- параметры силового фильтра. На частотах выше полосы пропускания регулятора до нескольких сотен кГц модуль импеданса определяется параметрами силового сглаживающего фильтра. С повышением частоты возмущения по цепи нагрузки существенное влияние начинают оказывать паразитные параметры элементов схемы и монтажа.

С целью определения способов минимизации импеданса регулируемой шины СЭП проведено исследование в среде OrCAD 16.2 имитационной модели ИСН понижающего типа с различными вариантами управления, параметрами фильтра, частотой коммутации и количеством фаз.

Исследование проводилось с тест-сигналом в диапазоне частот от 10 Гц до 150 кГц. Для объективности сопоставления результатов во всех случаях использовалась одинаковая удельная нагрузка. Частота коммутации ключевых элементов ИСН составляла 50 кГц, номинальное выходное напряжение СЭП – 100 В, номинальная мощность каждого стабилизатора – 700 Вт.

Выходной импеданс регулируемой шины СЭП вычисляется по формуле

$$Z(f) = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{в}}(f),$$

где $Z(f)$ – импеданс, соответствующий возмущению по цепи нагрузки с размахом $\Delta I_{\text{в}}$ при частоте возмущения f ; $\Delta U_{\text{вых}}$ – размах пульсаций выходного напряжения.

ИСН, включающие нелинейную импульсную и непрерывную части, относятся к классу дискрет-

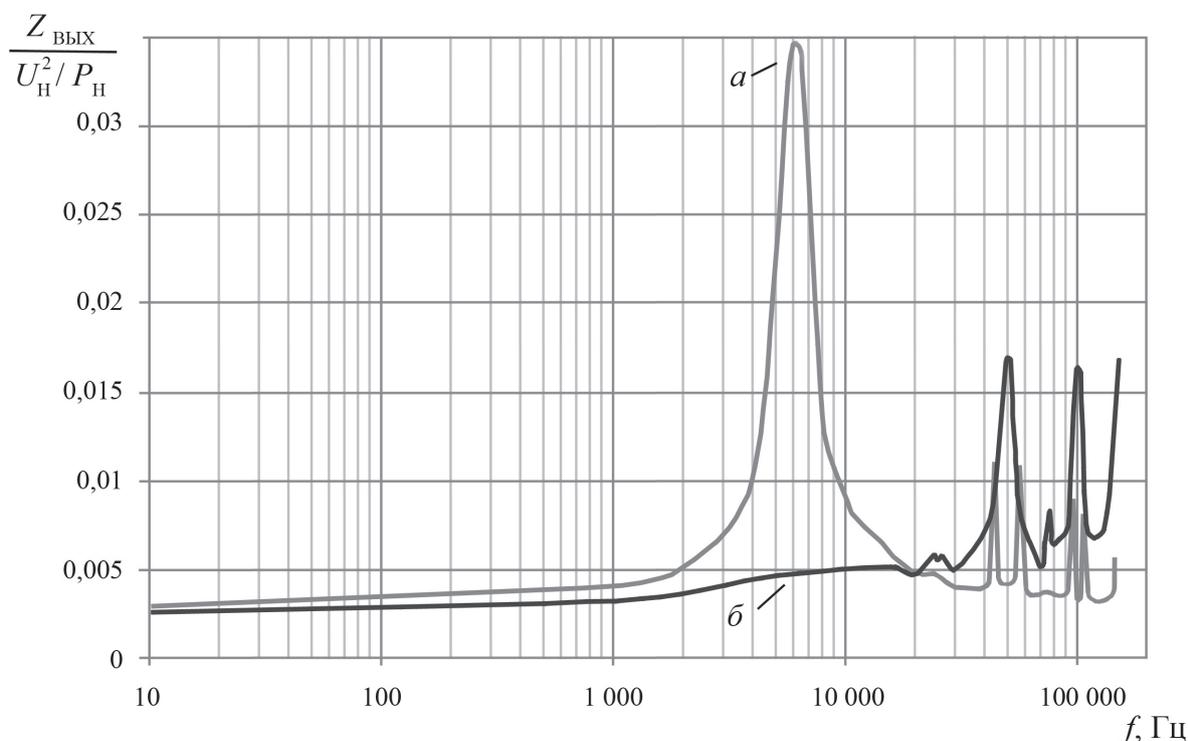


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика импеданса ИСН: а) СУ на основе ПИД-регулятора; б) СУ с прогнозированием тока дросселя

но управляемых систем автоматического регулирования.

В большинстве ИСН для управления ключевым элементом применяют широтно-импульсную модуляцию. Типовым для стабилизаторов с широтно-импульсной модуляцией является пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор. На АЧХ импеданса ИСН с таким регулятором (рис. 1, а) видно, что граница полосы пропускания находится около 6 кГц, что составляет $f_w/8$. Связано это, прежде всего, с инерционностью корректирующего устройства регулятора.

Для реализации быстродействующего преобразователя взамен инерционного целесообразно применять управление на основе прогноза, когда управляющие воздействия вырабатываются исходя как из текущих, так и из ожидаемых в будущем значений координат СУ. Для такой динамической системы, как импульсный стабилизатор, прогноз осуществляется на периоде коммутации.

Для того, чтобы управлять не только статикой, но и динамикой процесса в схеме понижающего ИСН, необходимо измерять и соответственно прогнозировать пульсирующую составляющую тока $\tilde{i}_L = i_L - i_n$ [5].

При подчиненном регулировании тока \tilde{i}_L по уравнению

$$x(t) + k_c \tilde{i}_L(t) = 0,$$

где $x(t)$ – сигнал ошибки; k_c – коэффициент связи, обеспечивается аperiodический характер переходного процесса, так как вследствие отрицательной знакоопределенности отношения

$$\frac{\tilde{i}_L}{x} = -\frac{1}{k_c}$$

ошибка x в переходном процессе только убывает.

Предложен способ управления с прогнозированием тока дросселя для многофазных преобразователей, обеспечивающий равномерное распределение тока нагрузки между силовыми модулями. Способ основан на широтно-импульсной модуляции с линейной комбинацией в сигнале развертки Y_{pj} расчетного значения пульсирующей составляющей тока дросселя на интервале времени до момента коммутации ключевого элемента

$$\tilde{i}_{Lj} = \frac{U_{nj} - U_{\text{вых}j}}{L_j T} t_{pj}$$

и ее прогнозируемого значения на интервале после этой коммутации

$$\tilde{i}_{Lj} = U_{\text{вых}j} \left(1 - \frac{t_{pj}}{L_j T} \right),$$

где U_{nj} – напряжение на входе j -го стабилизатора; $j=1, \dots, N$ – индекс соответствия с его номером; $U_{\text{вых}j}$ – выходной сигнал; L_j – индуктивность дросселя; t_{pj} – сигнал синхронизации; T – длительность периода синхронизации.

Закон управления описывается уравнением

$$F_j = x_j + k_{cj} (i_{L_{cpj}} - i_n / N) + k_{cj} Y_{pj}, \quad (1)$$

где x_j – сигнал ошибки; $k_{cj} = 1/L_j$; $i_{L_{cpj}}$ – среднее на интервале синхронизации значение тока дросселя; i_n – ток нагрузки; N – количество параллельно работающих стабилизаторов.

Сигнал развертки равен

$$Y_{pj} = U_{nj} \frac{t_{pj}}{T} - U_{\text{вых}j},$$

а состояние ключевого элемента

$$VT_j = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 < t_{pj} < t_{kj}; \\ 0 & \text{при } t_{kj} < t_{pj} < T, \end{cases}$$

где $VT_j=1$ и $VT_j=0$ – ключевой элемент включен либо выключен соответственно; t_{kj} – моменты выключения ключа, определяемые наименьшим положительным корнем уравнения $F(t)=0$.

Систему можно рассматривать как релейную с уровнем гистерезиса, изменяемым таким образом, что соответствующее переключение по состоянию совпадает с моментом синхронизации. При этом предельный цикл (рис. 2), определяемый пульсирующей составляющей выходной координаты, устанавливается таким образом, что $x(t_k)=0$, а среднее за период пульсаций значение сигнала ошибки x_0 может быть смещено относительно нуля на значение, не превышающее половины размаха пульсаций:

$$x_0 \leq 0,5 \{ (x_1 - x_2) [\gamma_0 - (1 - \gamma_0)] \},$$

где γ_0 – коэффициент заполнения импульса в установившемся режиме. Этим обеспечивается астатизм системы, т. е. интегратор в схеме управления, являющийся инерционным звеном, не нужен.

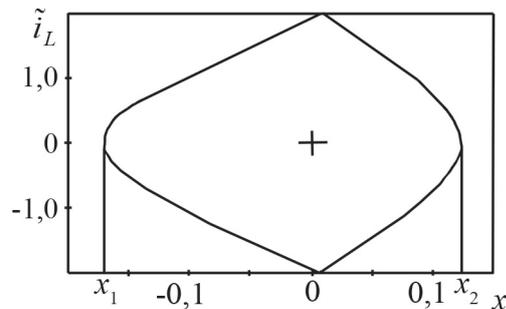


Рис. 2. Предельный цикл в установившемся режиме ($\gamma_0=0,6$)

Устойчивость предельного цикла обеспечивается тем, что при управлении с прогнозированием момент переключения импульсного элемента определяется с учетом последующего после коммутации воздействия на непрерывную часть.

В уравнении закона (1) в качестве тока нагрузки ИСН используется ток i_n/N , соответствующий идеальному токораспределению. Отклонение $i_{L_{cpj}}$ от i_n/N является корректирующим сигналом в контуре токораспределения.

Из результатов исследования АЧХ модели стабилизатора напряжения на основе СУ (рис. 1, б),

реализующей вышеописанный закон управления с прогнозированием тока дросселя, видно, что при изменении частоты тест-сигнала в диапазоне от 10 Гц до 100 кГц в системе имеются низкочастотные биения с практически значимыми полюсами на частотах $(1/4, 1/3, 1/2, 1, 2, 3) f_n$ [6].

С целью ослабления низкочастотных биений предложено в цепь быстродействующего регулятора обратной связи по току включить фильтр низких частот (ФНЧ), частота среза которого равна $f_n/4$. Выбор данной частоты обоснован тем, что при частотах возмущения свыше $f_n/4$ СУ в соответствии с теоремой Котельникова уже не может формировать адекватные управляющие воздействия.

Применение фильтра обеспечивает значительное снижение уровня биений (рис. 3, б). Однако он вносит искажения в сигнал обратной связи, и на частотах, меньших частоты $f_n/4$, происходит рост импеданса.

Также увеличение частоты преобразования (рис. 3, в) приводит к сдвигу полюсов в сторону высоких частот, где качество выходного напряжения обеспечивают емкостные фильтры. Таким образом, снижается уровень импеданса, что обусловлено как уменьшением пульсаций тока дросселя, так и повышением количества моментов управления, о чем говорилось ранее. Помимо этого обеспечивается монотонность АЧХ импеданса на ее нормируемом участке. Из характеристики (рис. 3, г) видно, что сочетание вышеописанных мер по-

зволяет значительно снизить импеданс, особенно в области полюсов. Вызвано это тем, что при увеличении частоты преобразования полюса характеристики импеданса сдвигаются в сторону больших частот, а с ростом частоты возмущения влияние фильтра в цепи обратной связи усиливается. Таким образом отключается сигнал обратной связи на частотах, на которых система управления уже не может обеспечить адекватное управляющее воздействие.

Для оценки АЧХ импеданса многофазного преобразователя с равномерным токораспределением тока нагрузки как средства парирования низкочастотных биений проведено исследование имитационной модели трех параллельных ИСН понижающего типа с различными вариантами управления и количеством фаз. Во всех случаях использовалась одинаковая нагрузка, втрое превышающая номинальную для одного силового канала. Частота коммутации ключевых элементов равнялась 50 кГц, номинальное напряжение нагрузки СЭП составляло 100 В, номинальная мощность каждого канала преобразователя – 700 Вт.

Характеристика импеданса системы из трех силовых каналов на основе СУ с прогнозированием тока дросселя и распределением тока в однофазном режиме (рис. 4, а) так же, как и в случае с единичным ИСН, монотонна в пределах полосы пропускания. За полосой пропускания наблюдаются полюса, вызванные биениями. Видно, что много-

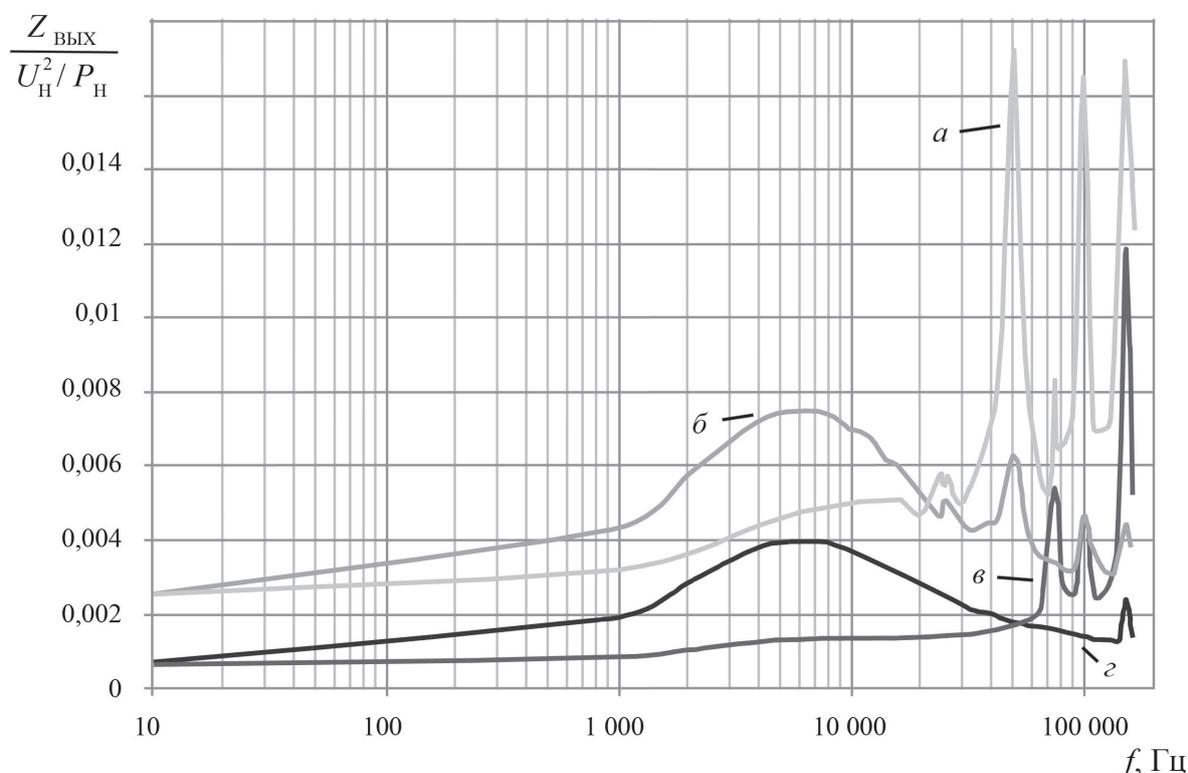


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика ИСН, СУ которого основана на прогнозировании тока дросселя: а) базовая модель; б) с ФНЧ в цепи обратной связи; в) при утроенной относительно начальной частоте коммутации; г) при утроенной относительно начальной частоте коммутации и с ФНЧ в цепи обратной связи

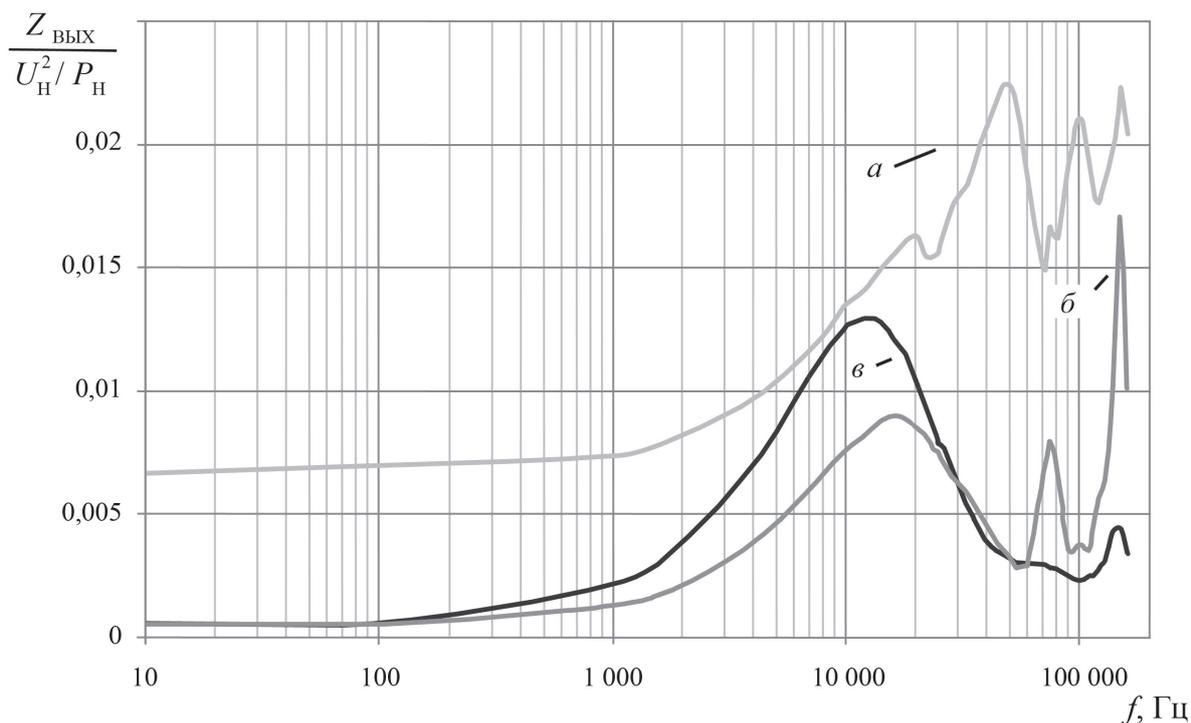


Рис. 4. Исследование импеданса трех параллельных ИСН на основе СУ с прогнозированием тока дросселя и токораспределением: а) в однофазном режиме; б) в многофазном режиме; в) в многофазном режиме с ФНЧ в цепи ОС

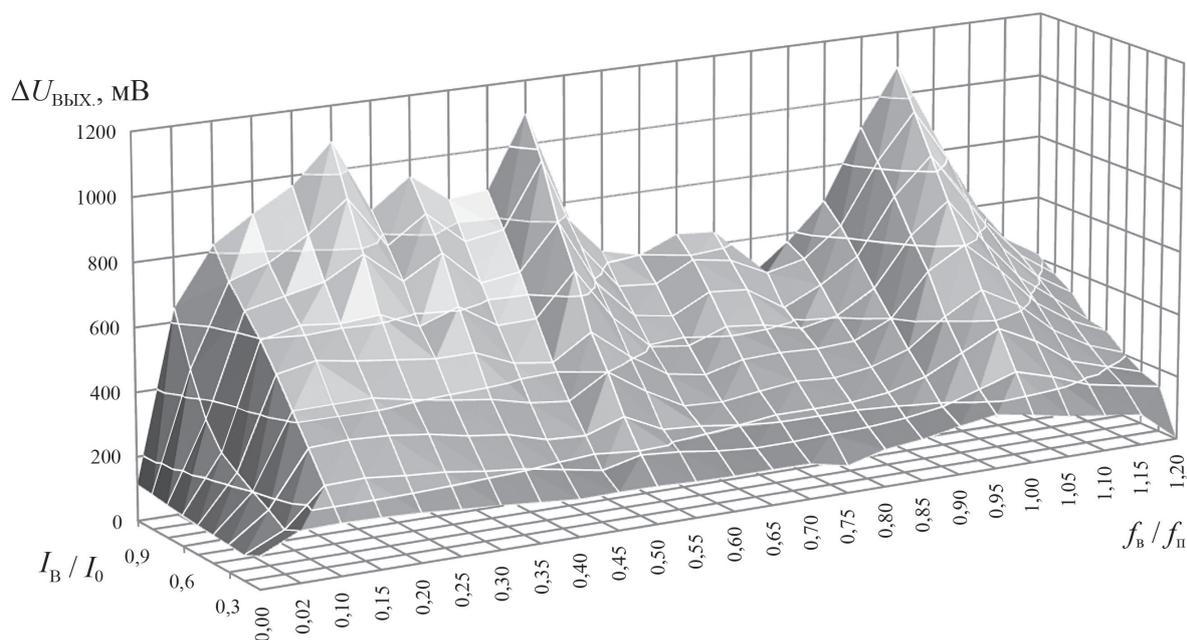


Рис. 5. Размах пульсаций выходного напряжения ИСН при различных возмущениях нагрузки

фазный режим параллельных стабилизаторов позволяет существенно минимизировать импеданс в широком диапазоне частот (рис. 4, б). Причем полюса АЧХ импеданса, вызванные биениями, в данном случае образуются относительно эквивалентной частоты преобразования. Введение в многофазный преобразователь ФНЧ, отключающего сигнал обратной связи по току, позволяет откорректировать характеристику импеданса наилучшим образом (рис. 4, в).

Итоговые результаты исследования зависимости пульсаций выходного напряжения $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ ИСН от амплитуды тест-сигнала I_B и его частоты f представлены в виде поверхностной диаграммы (рис. 5).

Из диаграммы следует, что амплитуда пульсаций $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ с ростом амплитуды тест-сигнала увеличивается, полюса на кратных частотах проявляются четче. ФНЧ дает положительные результаты при $I_B / I_0 < 0,5$. При этом АЧХ импеданса $Z_{\text{ВЫХ}} = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / (2I_B)$ от уровня тест-сигнала зависит слабо.

Выводы

Показано, что амплитудно-частотная характеристика выходного импеданса импульсного стабилизатора напряжения, составляющего многофазный преобразователь системы электропитания модульной структуры, при частотах возмущения по цепи нагрузки вблизи собственных частот системы управления содержит полюса, вызываемые низкочастотными биениями.

Предложен закон управления многофазным преобразователем напряжения, суть которого заключается в том, что сигнал переменной составляющей тока дросселя каждого силового модуля определяется как разность между средним за период коммутации током дросселя этого модуля и током нагрузки, деленным на количество модулей.

Построение многофазных импульсных преобразователей на основе предлагаемого закона управления с использованием фильтра с полосой пропускания от нуля до $1/4$ частоты преобразования в контуре обратной связи по току позволяет минимизировать импеданс в диапазоне частот до 100 кГц и выше.

Для минимизации импеданса выходной шины системы электропитания необходимо повышать частоту коммутаций ключевых элементов, осуществлять многофазный режим параллельно соединенных стабилизаторов напряжения, обеспечивать равномерное распределение тока нагрузки между силовыми каналами, увеличивать емкость выходного фильтра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соустин Б.П., Иванчура В.И., Чернышев А.И., Исляев Ш.Н. Системы электропитания космических аппаратов. – Новосибирск: Наука, 1994. – 318 с.
2. Шкоркин В.В. Методика измерения выходного импеданса импульсных стабилизаторов напряжения // Научная сессия ТУСУР-2008: Матер. докл. Всерос. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2008. – Т. 2. – С. 325–327.
3. ESA ECSS-E-ST-20C Second iss. July 2008. – P. 27–28.
4. Пожаркова И.П., Капулин Д.В. Методика формирования требований к выходному импедансу систем электропитания космических аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. – 2011. – № 6. – С. 12–16.
5. Казанцев Ю.М. Динамика управляемых преобразовательных устройств. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 126 с.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи: 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.

Поступила 06.03.2012 г.

УДК 621.314

АВТОНОМНАЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА

Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, В.В. Аржанов, О.А. Теуцаков, А.В. Осипов, К.В. Аржанов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: shua@main.tusur.ru

Приведены результаты проектирования автономной фотоэлектрической энергетической установки с максимальной выходной мощностью 1,5 кВт с экстремальным регулированием мощности солнечных батарей и их автоматическим слежением за Солнцем.

Ключевые слова:

Автономная фотоэлектрическая энергетическая установка, солнечная батарея, аккумуляторная батарея, энергетическая эффективность, экстремальное регулирование мощности, автоматическое слежение за Солнцем.

Key words:

Stand-alone photovoltaic power system, solar panel, battery, energy efficiency, extreme power control, automatic tracking at the sun.

Создание высокоэффективных автономных фотоэлектрических энергетических установок (АФЭУ) в первую очередь определяется использованием источников тока (солнечных и аккумуляторных батарей) с улучшенными технико-экономическими показателями. Однако даже при самых совершенных источниках энергии, энергетическая установка может обладать невысокими энергетическими характеристиками из-за нерационального использования их возможностей. Поэ-

тому, при проектировании высокоэффективных автономных фотоэлектрических энергетических установок, должна решаться задача как разработки (использования) солнечных батарей (СБ) с повышенным КПД и аккумуляторных батарей (АБ) с улучшенными техническими характеристиками, так и задача системного проектирования фотоэлектрических систем и энергетических установок с целью повышения их энергетической эффективности [1].