

05.09.03  
0-466

Контроль  
экземпля

*На правах рукописи*

ОЗЕРОВ Леонид Алексеевич

СИНТЕЗ РАЗРЫВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ  
АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМОВ

Специальность 05.09.03 –  
«Электротехнические комплексы и системы,  
включая их управление и регулирование»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный  
читальный зал

Челябинск 1999

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Казаринов Л.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Волович Г.И.,  
кандидат технических наук, доцент  
Ефимов В.И.

Ведущее предприятие – фирма ПОЛЕТ.

Защита состоится 24 марта 1999г., в 10 часов, на заседании  
диссертационного совета Д.053.13.07 при Южно-Уральском государственном  
университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

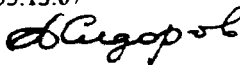
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан \_\_\_ февраля 1999 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.053.13.07

д.т.н., профессор

 Сидоров А.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

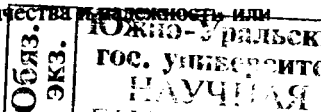
**Актуальность работы.** Надежность и высокое качество функционирования автономного объекта техники – спутника, автоматической станции, самолета, наземного транспортного средства, узла связи и других технических средств, в большой степени зависит от надежной работы его автономной системы электроснабжения (АСЭС), которая обеспечивает объект электроэнергией.

Основными тенденциями в развитии современных АСЭС являются увеличение их сложности, длительности функционирования в автономном режиме, увеличение общей мощности АСЭС, увеличение удельного веса, объема и стоимости АСЭС от веса, объема и стоимости всего объекта (для космических летательных аппаратов до 30%), зависимость автономного срока эксплуатации объекта от автономного срока работы АСЭС (особенно для спутниковых АСЭС), унификация элементов и подсистем АСЭС, возможность гибкого изменения структуры АСЭС в зависимости от условий эксплуатации и мощности потребителей энергии на объекте, автоматизация и внедрение микропроцессорной техники во все уровни управления в АСЭС: управление преобразующими устройствами и регулирование (стабилизация) выходных параметров напряжения преобразователей, управление на уровне структуры АСЭС в зависимости от режима работы АСЭС, управление надежностью и резервом (поиск и отключение или локализация неисправных и подключение резервных элементов) в АСЭС. Требование увеличения ресурса работы АСЭС вытекают из требования увеличения срока эксплуатации автономного объекта.

Задачи увеличения ресурса работы, а, следовательно, увеличения надежности АСЭС, создания полностью автоматизированных АСЭС длительного автономного функционирования, проектирования и изготовления ряда однотипных АСЭС различной мощности с одной стороны, и требования удешевления и сокращения времени на проектирование и изготовление АСЭС различной мощности и различного назначения, с другой стороны, обычно противоречивы. Одним из направлений проектирования и создания высокоэффективных, надежных АСЭС с возможностью гибкого изменения назначения системы путем изменения процентного соотношения в системе модулей различного типа и установочной мощности (путем увеличения или уменьшения числа однотипных модулей) сглаживающим эти противоречия, является создание унифицированных модульных АСЭС.

Проектирование унифицированных модульных систем требует решения ряда технических задач, одной из которых является задача синтеза управления в модульных и многоканальных АСЭС содержащих преобразователи энергии.

Существующие методы управления в модульных и многоканальных системах имеют недостаточные характеристики качества, надежности или



сложную процедуру синтеза регулирующих устройств, которая не учитывает нелинейные свойства системы.

Сказанное позволяет утверждать, что и сегодня актуальной является задача синтеза управления качеством стабилизации параметров электроэнергии на выходе модульной АСЭС.

Решение этой задачи позволит повысить надежность процессов управления на уровне преобразования энергии, повысить качество электроэнергии на выходе АСЭС, обеспечит равномерную загрузку модулей при параллельной работе модулей на общую шину нагрузки или независимость (автономность) работы модулей на отдельные нагрузки.

Актуальность данной работы подтверждается и включением ее в координационный план НИР "Разработка предложений по модульному построению систем электропитания" (шифр НИР "Установка-101К", ТЗ № 353П-000-17943-501ТЗ).

**Цель работы** – синтез (разработка) управления в модульных и многоканальных АСЭС с учетом нелинейного (разрывного) характера воздействия управления в каждом канале (модуле) с преобразователем энергии - вторичным источником питания (ВИП).

**Идея работы** - использование скользящих режимов в АСЭС как в системе с разрывным управлением, позволяющих придать АСЭС новые полезные свойства – автономности и инвариантности и упростить методику расчета и построения регуляторов АСЭС.

#### **Научные положения и результаты, выносимые на защиту**

1. Синтез разрывного управления в многоканальных АСЭС и в отдельных базовых ВИП может быть осуществлен с помощью скользящих режимов и уравнений предложенного системного центра, который задает желаемое (модельное) движение системы

2. Желаемое качество процесса стабилизации, инвариантность системы к возмущениям, автономность (независимость) каналов системы относительно первичного источника питания (ПИП) и друг от друга, понижение порядка эквивалентной системы, обеспечиваются использованием в АСЭС скользящих режимов в качестве рабочих на пространстве отклонений желаемых координат от координат АСЭС

3. Предложена децентрализованная (двухуровневая) иерархия управления в АСЭС с локальным (в канале) и глобальным (в системном центре) уровнями формирования сигналов управления.

4. Проведено доказательство устойчивости скользящих режимов.

5. Выведены соотношения для определения характера взаимодействия по цепям питания между ПИП и модульным преобразователем энергии

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается принятыми уровнями допущений при разработке математических моделей АСЭС и преобразователей энергии. Исходными посылками, вытекающими из основ теории автоматического

управления, теории разрывного управления, удовлетворительной сходимостью теоретических результатов исследований с результатами экспериментов на цифровых и на физических моделях.

**Научное значение работы** состоит в том, что разработаны методы синтеза разрывного управления в АСЭС с промежуточным звеном преобразования энергии в виде многоканальных ВИП, а так же, в отдельных базовых ВИП постоянного тока, на основе создания локальных скользящих режимов в каналах АСЭС с целью придания системе новых свойств – автономности и инвариантности к возмущениям и снижения порядка синтезируемой системы. Для вычисления координат заданий АСЭС, разрешимости вычислительных процессов и соблюдения условий инвариантности, координаты заданий вычисляются в предложенном системном центре АСЭС (модели АСЭС пониженного порядка) или предварительном фильтре базового ВИП.

Разработана процедура параметрического согласования ПИП и многоканального ВИП по цепям питания для обеспечения динамической устойчивости комплекса и обеспечения желаемого процесса взаимодействия.

**Практическое значение работы** заключается в том что, формализована процедура синтеза разрывного управления в АСЭС и разработана методика построения и расчета регуляторов многоканальных ВИП и вычислителей заданий – системных центров или предварительных фильтров базовых ВИП. Разработаны системы управления (регуляторы) для АСЭС с суммированием мощности каналов и для АСЭС с распределением энергии по отдельным потребителям. Разработаны регуляторы для базовых ВИП в с построением предварительных фильтров.

**Реализация работы.** Научные положения, выводы и рекомендации использованы в опытно-конструкторской и научно-исследовательской работе ЦСКБ (г. Самара), СКБ "РОТОР" (г. Челябинск), НИИ Автоматики (г. Екатеринбург) по темам "Разработка модульных систем электропитания орбитальных космических аппаратов" и "Разработка многоканальных и модульных полупроводниковых преобразователей с равномерным токораспределением между модулями", а также в опытно-конструкторской работе МЭНИИ НПОЭ (г. Миасс) по теме "Синтез разрывного управления и разработка регулятора в многоканальной системе стабилизации".

**Апробация работы.** Основные материалы и результаты диссертационной работы были доложены, рассмотрены и одобрены на IX Всесоюзной научной конференции "Моделирование электроэнергетических систем" (Рига, 1987 г.), на X Всесоюзном семинаре "Роботизация, автоматизация и управление" (Тбилиси, 1986 г.), на Всесоюзном семинаре "Кибернетика электроэнергетических систем" (Челябинск, 1990 г.), на Всесоюзной конференции "Декомпозиция и координация в сложных системах" (Челябинск, 1986 г.), на Всесоюзных семинарах "Кибернетика электротехнических систем" (Челябинск, 1974 г., 1978 г.), на Всесоюзных

семинарах "Автоматизированное проектирование электротехнических устройств и комплексов в автономной электроэнергетике" (Челябинск, 1981 г., 1982 г.), на отраслевой научно-технической конференции "Проблемы комплексного проектирования и испытания энергетических устройств космических аппаратов" (Куйбышев, ЦСКБ, 1986 г.), на научно-технических конференциях ЧПИ и ЧТУ (1986 - 1996 г.г.)

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 23 печатных работы, в том числе 5 авторских свидетельств.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 148 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка, 1 таблицу и список использованной литературы и 153 наименований.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ структур существующих многомодульных АСЭС различного назначения показал, что имеется тенденция выполнения АСЭС из модулей узкого (специального) назначения нескольких типоразмеров. Специализация модулей вытекает из структурного разделения АСЭС на подсистемы: генерирования или производства энергии, накопления или аккумуляирования энергии, преобразования, регулирования и распределения энергии. Проектировщик АСЭС используя номенклатуру типоразмеров разработанных базовых модулей этих подсистем может проектировать и компоновать системы (на основе модульного принципа построения) различного назначения, различной установочной мощности с заданным ресурсом, с минимизацией затрат на проектирование, испытание и изготовление новых АСЭС. При этом эксплуатационная надежность достигается при минимальном резервном избытке числа модулей.

Структурные схемы АСЭС с преобразованием энергии в каналах (модулях), подсистемы или части АСЭС в определенных режимах работы можно условно отнести к трем типовым видам структурного построения схем многоканальных или модульных АСЭС: А, Б, В. К виду А принадлежат системы с одним или несколькими ПИП, которые объединены по выходным выводам на первичной шине, с несколькими модулями преобразователей энергии одинаковой мощности ( $ВИП_{i,i=\overline{1,m}}$ ), которые соединены параллельно для суммирования мощности на вторичной шине (рис.1). Приемники энергии подсоединены ко вторичной шине. К виду Б относятся АСЭС с одним или несколькими ПИП, которые объединены по выходным выводам на первичной шине, с несколькими модулями преобразователей энергии различной мощности ( $ВИП_{i,i=\overline{1,m}}$ ), которые подсоединены к первичной шине и работают на индивидуальные нагрузки ( $Н_{i,i=\overline{1,m}}$ ). К виду В отнесем АСЭС с несколькими ПИП, которые подсоединены по цепям питания к индивидуальному ВИП, а все  $ВИП_{i,i=\overline{1,m}}$  по силовым выводам объединены на общей выходной шине, к которой уже подсоединяются нагрузки  $Н_{i,i=\overline{1,k}}$ .

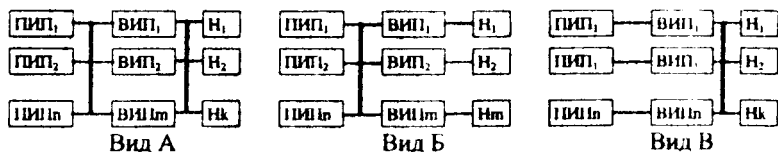


Рис. 1. Основные виды структурных схем многоканальных АСЭС

Любую АСЭС содержащую многоканальную или модульную преобразовательную часть по виду структуры можно отнести к одному из типовых видов или выделить в ней фрагмент с типовой структурой А, Б или В. Например, в спутниковой АСЭС построенной на солнечных батареях и буферных аккумуляторах, рабочую часть АСЭС в режиме разряда аккумуляторов можно рассматривать как многоканальную структурную схему вида В.

К задачам управления в АСЭС со структурой вида А нужно отнести задачу стабилизации на заданном уровне напряжения на вторичной шине АСЭС при возмущениях со стороны потребителей и по напряжению ППП и задачу равномерного токораспределения между модулями ( $ВИП_i, i = \overline{1, m}$ ).

Задачей управления в АСЭС со структурой вида Б является задача стабилизации на заданных уровнях выходных напряжений всех каналов ( $ВИП_i, i = \overline{1, m}$ ) при возмущениях по току со стороны потребителей каждого ВИП, и по напряжению ППП и обеспечения независимости (автономности) каналов (модулей -  $ВИП_i, i = \overline{1, m}$ ) друг от друга при наличии взаимодействия каналов через общую первичную шину.

Задачей управления в АСЭС со структурой вида В является задача стабилизации выходного напряжения на общей выходной шине всех модулей ( $ВИП_i, i = \overline{1, n}$ ) с равномерным токораспределением между модулями ( $ВИП_i, i = \overline{1, n}$ ) при равной мощности всех ППП,  $i = \overline{1, n}$ .

В современных регуляторах напряжения многоканальных и модульных АСЭС и преобразователях синтез управления проводится обычно частотными методами, применяются последовательная и параллельная коррекция в модулях (преобразователях каналов). Наиболее используемые передаточные функции последовательных корректирующих устройств:  $W_k(p) = (1+pT_3)/(1+pT_4)$ ;  $W_k(p) = (1+pT_2)^2/(1+pT_1)(1+pT_3)$ ;  $W_k(p) = (1+pT_2)(1+pT_3)/(1+pT_1)(1+pT_4)$ ;  $W_k(p) = (1+pT_2)^2(1+pT_3)/((1+pT_1)(1+pT_4)$ ;  $W_k(p) = (1+pT_2)^2/((1+pT_3)pT_1)$ ;  $W_k(p) = (1+pT_2)(1+pT_3)/((1+pT_4)pT_1)$ .  $T_2 = (1-15)T$ , где  $T_1 > T_2 > T > T_3 > T_4$  - постоянные времени корректирующих устройств,  $T = \sqrt{LC}$  - постоянная времени LC фильтра одного канала АСЭС.

Известная передаточная функция параллельного корректирующего устройства  $W_k(p) = 1/(1+pT_4)$ , где  $T_4 = (0,5..0,7)T$ .

Для выравнивания токов модулей в АСЭС видов А и В применяются семь типов обратных связей (ОС) по току модулей, основные из которых это ОС по отклонению тока дросселя ведомого модуля от тока дросселя ведущего модуля, местная ОС по току дросселя (подчиненное управление)

и ОС по отклонению тока дросселя модуля от среднего тока нагрузки  $F_{\text{cp}} = F/n$ , где  $n$  – число модулей (ВИП) в каналах,  $F$  – ток нагрузки АСЭС.

Остальные выравнивающие схемы ОС по току используются редко, т.к. дают заведомо худшие результаты.

Общий недостаток упомянутых схем регуляторов напряжения многоканальных АСЭС с суммированием энергии каналов в том, что синтез управления в них проводился в предположении, что система линейна, то есть ШИМ с силовым транзисторным ключом, работающим в импульсном режиме, принимают за линейное звено (при работе ШИМ в области линейной зависимости среднего за период квантования значения выходного сигнала ШИМ от сигнала управления  $S_i$ ), и рассматривают только малые отклонения координат в некотором диапазоне частот ( $0 < \omega < \omega_c \ll 1/(15\omega_0)$ ), где  $\omega_c \ll 1/(15\omega_0)$  неравенство показывающее расположение частоты среза  $\omega_c$  относительно несущей частоты ШИМ (квантования)  $\omega_0$ . В этом диапазоне частот импульсную систему считают линейной.

Отмеченные допущения при синтезе управления и не учет нелинейности ШИМ, разрывного управления и многосвязности системы приводят к снижению качества процесса стабилизации выходного напряжения АСЭС особенно при больших коммутационных скачках тока нагрузки по причине временного насыщения ШИМ и к возникновению многочастотных автоколебаний из-за сложных взаимодействий каналов АСЭС через ПИП и общие шины.

Для устранения указанных недостатков, обеспечения высокой динамической и статической точности, получения желаемого процесса стабилизации выходного напряжения АСЭС при любых допустимых возмущениях, предлагается синтез управления в многоканальных АСЭС проводить как в нелинейных многосвязных системах с разрывным управлением, а для придания АСЭС новых свойств инвариантности к возмущениям, автономности (независимости) каналов (модулей) и снижения порядка синтезируемой системы использовать скользящие режимы в каналах в качестве рабочих режимов АСЭС.

Рассмотрим синтез управления в АСЭС вида А.

Постановка задачи. Математическую модель АСЭС вида А с суммированием энергии каналов (ВИП) можно представить в виде системы:

$$\begin{aligned} \dot{X}_0 &= A_0 X_0 + \sum_{i=1}^n B_{0i}(X_i^1, X_i^2) u_i + LV(t) ; \\ \dot{X}_i^1 &= A_i^{11} X_i^1 + A_i^{12} X_i^2 + A^1_{i, n+1} X_{n+1} ; \\ \dot{X}_i^2 &= A_i^{21} X_i^1 + A_i^{22} X_i^2 + B_i^2(X_0) u_i + A^2_{i, n+1} X_{n+1} ; \\ \dot{X}_{n+1} &= A_{n+1} X_{n+1} + \sum_{i=1}^n (A^1_{n+1, i} X_i^1 + A^2_{n+1, i} X_i^2) + D_{n+1} f_{n+1} ; \\ Z &= \sum_{i=1}^n (G_i^1 X_i^1 + G_i^2 X_i^2) + G_{n+1} X_{n+1} , \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (1)$$



где  $X_0 \in R^m$  - вектор состояния ПИП;  $X_i^1 \in R^{m-1}$ ,  $X_i^2 \in R^1$ ,  $X_i = \{X_i^1, X_i^2\}^T \in R^m$  - вектор состояния ВИП;  $X_{n+1} \in R^1$  - состояние общего выхода АСЭС, в частности, напряжение на общей шине;  $u_i \in R^1$  - управление в ВИП;  $f_{n+1} \in R^1$  - возмущение (ток потребителей П);  $Z \in R^1$  - общий выход подсистем (ВИП,  $i = \overline{1, n}$ );  $V(t) \in R^1$  - параметр ПИП;  $A_0, B_0, L, A_i^{11}, A_i^{12}, A_i^{21}, A_i^{22}, B_i \in R^1$ ,  $A_{i,n+1} = \{A_{i,n+1}^1, A_{i,n+1}^2\}^T$ ,  $A_{n+1}, A_{n+1,1}^1, A_{n+1,1}^2, G_{n+1}, G_1^1, G_1^2$  - числовые и функциональные матрицы соответствующих размерностей, отражающие структуру связей в АСЭС. Предполагаем, что все подсистемы управляемы, а координаты  $X_0, X_i, X_{n+1}$  доступны для измерения. В качестве координат АСЭС используются переменные состояния для электрических цепей.

Ставится задача синтеза функций переключения  $S_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , для управлений  $u_i = 1$  при  $S_i = 0$ ,  $u_i = 0$  при  $S_i < 0$ , силовыми ключами ВИП. Условно принято, что  $u_i = 1$  соответствует замкнутому (проводящему) ключу, а  $u_i = 0$  - разомкнутому (непроводящему) ключу. Задача синтеза сводится к определению выражений для поверхностей (законов или функций) переключения ключевых элементов  $S_i = 0 \forall i = \overline{1, n}$ , обеспечивающих решение поставленной задачи.  $S_i$  определяется как функция координат, заданий  $Z^*(t)$ , внешних воздействий и возмущений  $S_i = S_i(X_i^1, X_i^2, X_{n+1}, Z^*(t), f_{n+1}, V(t))$ .

Вывод уравнений системного центра. Для решения поставленной задачи в классе разрывных управлений удобно синтезировать законы управления из условия возникновения во всех каналах АСЭС (ВИП) скользящих режимов. Удобство состоит в том, что, согласно теории скользящих режимов, возможно получение эквивалентного непрерывного описания процессов в АСЭС, инвариантных к возмущениям и обладающих свойством автономности. При этом происходит декомпозиция процессов и упрощаются процедуры анализа и синтеза. Однако, непосредственная организация скользящих режимов в АСЭС не приводит к решению поставленной задачи, т.к. не выполняется основное условие инвариантности  $\text{Im}[A_{n+1,1}^1, A_{n+1,1}^2]^T \subset \text{Im}[0, B_i^2]^T \forall i = \overline{1, n}$ , где  $\text{Im}[\cdot]$  образ матрицы  $[\cdot]$ .

Для устранения указанного недостатка автором разработан метод, основанный на уравнениях системного центра, который применительно к многоканальным АСЭС состоит в следующем.

Координатам состояния каналов АСЭС  $X_i^1, X_i^2 \forall i = \overline{1, n}$  и общей координате выхода системы  $X_{n+1}$  предписываются значения  $X_i^{1*}, X_i^{2*} \forall i = \overline{1, n}$ ,  $X_{n+1}^*$  такие, что превращается в тождество уравнение

$$Z^* = \sum_{i=1}^n (G_i^1 X_i^{1*} + G_i^2 X_i^{2*}) + G_{n+1} X_{n+1}^* \quad (2)$$

Соотношение (2) означает, что если координаты состояния АСЭС  $X_i^1, X_i^2 \forall i = \overline{1, n}$ ,  $X_{n+1}$  будут изменяться предписываемым образом (принимают некоторые желаемые значения  $X_i^{1*}, X_i^{2*}$ ), то значение выхода АСЭС  $Z$  совпадёт с желаемым значением общего выхода АСЭС  $Z^*$ .

В том числе, стремление  $X_i^1(t) \rightarrow X_i^{1*}(t)$ ,  $X_i^2(t) \rightarrow X_i^{2*}(t)$  означает, что из этого следует по (2) стремление  $Z(t) \rightarrow Z^*(t)$ .

Обозначим отклонения координат АС<sup>ОС</sup> от их предписываемых значений  $\tilde{X}_i^1 = X_i^1 - X_i^{1*}$ ,  $\tilde{X}_i^2 = X_i^2 - X_i^{2*}$ ,  $\forall i = \overline{1, n}$ ,  $\tilde{X}_{n+1} = X_{n+1}^* - X_{n+1}$ ,  $\tilde{Z} = Z - Z^*$  перепишем систему (2) в виде:

$$\begin{aligned} \dot{X}_0 &= A_0 X_0 + \sum_{i=1}^n B_{0i}(X_i^{1*}, \tilde{X}_i^1, X_i^{2*}, \tilde{X}_i^2) u_i + LV(t); \\ \dot{\tilde{X}}_i^1 &= A_i^{11} \tilde{X}_i^1 + A_i^{12} \tilde{X}_i^2 + A_{i, n+1}^1 \tilde{X}_{n+1} + F_{1i}; \\ \dot{\tilde{X}}_i^2 &= A_i^{21} \tilde{X}_i^1 + A_i^{22} \tilde{X}_i^2 - B_i^2(X_0) u_i + A_{i, n+1}^2 \tilde{X}_{n+1} + F_{2i}; \\ \dot{\tilde{X}}_{n+1} &= A_{n+1} \tilde{X}_{n+1} + \sum_{i=1}^n (A_{n+1, i}^1 \tilde{X}_i^1 + A_{n+1, i}^2 \tilde{X}_i^2) - D_{n+1} f_{n+1} + \\ &\quad + \dot{X}_{n+1}^* - A_{n+1} X_{n+1}^* - \sum_{i=1}^n (A_{n+1, i}^1 X_i^{1*} + A_{n+1, i}^2 X_i^{2*}); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\dot{\tilde{Z}} = \sum_{i=1}^n (G_i^1 \tilde{X}_i^1 + G_i^2 \tilde{X}_i^2) + G_{n+1} \tilde{X}_{n+1}, \quad i = \overline{1, n}, \quad \text{где}$$

$$F_{1i} = \dot{X}_i^{1*} - A_i^{11} X_i^{1*} - A_i^{12} X_i^{2*} - A_{i, n+1}^1 X_{n+1}^*, \quad F_{2i} = \dot{X}_i^{2*} - A_i^{21} X_i^{1*} - A_i^{22} X_i^{2*} - A_{i, n+1}^2 X_{n+1}^*$$

Будем исходить из требования, чтобы  $X_i^{1*}, X_i^{2*}$  удовлетворяли (2) и дифференциальным уравнениям:

$$\dot{X}_i^{1*} = A_i^{11} X_i^{1*} + A_i^{12} X_i^{2*} + A_{i, n+1}^1 X_{n+1}^*; \quad (4)$$

$$\dot{X}_{n+1}^* = A_{n+1} X_{n+1}^* + \sum_{i=1}^n (A_{n+1, i}^1 X_i^{1*} + A_{n+1, i}^2 X_i^{2*}) + D_{n+1} f_{n+1}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Уравнения (2), (4) называются уравнениями системного центра, они разрешимы, т.к. число неизвестных  $\sum_{i=1}^n n_i + 1$  совпадает с числом уравнений. Начальные условия для неизвестных (2), (4) определяются только через  $Z^*(0)$ ,  $f_{n+1}(0)$ . С учетом (2), (4) система (3) примет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{X}}_i^1 &= A_i^{11} \tilde{X}_i^1 + A_i^{12} \tilde{X}_i^2 + A_{i, n+1}^1 \tilde{X}_{n+1}; \\ \dot{\tilde{X}}_i^2 &= A_i^{21} \tilde{X}_i^1 + A_i^{22} \tilde{X}_i^2 - B_i^2(X_0) u_i + A_{i, n+1}^2 \tilde{X}_{n+1} + F_{2i}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\dot{\tilde{X}}_{n+1} = A_{n+1} \tilde{X}_{n+1} + \sum_{i=1}^n (A_{n+1, i}^1 \tilde{X}_i^1 + A_{n+1, i}^2 \tilde{X}_i^2);$$

$$\dot{\tilde{Z}} = \sum_{i=1}^n (G_i^1 \tilde{X}_i^1 + G_i^2 \tilde{X}_i^2) + G_{n+1} \tilde{X}_{n+1}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Система (5) имеет регулярный вид управляемости и позволяет достичь инвариантности к  $F_{2i}$ , при соблюдении (2), (4). Однако, система (5) не является полностью инвариантной и независимой от координат  $X_0$  ПИП, то есть, не является автономной.

Синтез разрывного управления. Для решения задачи синтеза выберем поверхности переключения  $S_i$  в виде  $S_i = c_i^1 \tilde{X}_i^1 + c_i^2 \tilde{X}_{n+1} + \tilde{X}_i^2$ ,  $S_i \in R^1$ ,  $c_i^1 \in R^{n-1}$ ,  $c_i^2 \in R^1 \quad \forall i = \overline{1, n}$ . Если управления  $u_i = 1$   $S_i > 0$ ,  $u_i = 0$   $S_i < 0$ , обеспечат

скользящие режимы в каналах АСЭС, то в скользящем режиме движение системы (5) вдоль поверхности  $S_i=0 \forall i = \overline{1, n}$  по методу эквивалентного движения примет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{X}}_i^1 &= (A_i^{11} - A_i^{12} c_i^1) \tilde{X}_i^1 + (A_{i, n+1}^1 - A_i^{12} c_i^2) \tilde{X}_{n+1}; \\ \dot{\tilde{X}}_i^2 &= -c_i^1 \tilde{X}_i^1 - c_i^2 \tilde{X}_{n+1}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\dot{\tilde{X}}_{n+1} = A_{n+1} \tilde{X}_{n+1} + \sum_{j=1}^n (A_{n+1, j}^1 \tilde{X}_j^1 + A_{n+1, j}^2 (-c_j^1 \tilde{X}_j^1 - c_j^2 \tilde{X}_{n+1}));$$

$$\dot{\tilde{Z}} = \sum_{i=1}^n (G_i^1 - G_i^2 c_i^1) \tilde{X}_i^1 + (G_{n+1} - \sum_{i=1}^n G_i^2 c_i^2) \tilde{X}_{n+1}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Из (6) следует, что процесс слежения (стабилизации)  $\tilde{Z}=0$  (или  $Z=Z^*$ ) в каналах АСЭС в скользящем режиме инвариантен к возмущениям, автономен и может быть осуществлен с заданным качеством. Т.к. система (5) управляема, то для (6) может быть решена задача модального синтеза путем выбора коэффициентов  $c_i^1, c_i^2$  из условия обеспечения желаемого спектра матрицы системы (6)

$$\begin{bmatrix} A_1^{11} - A_1^{12} c_1^1 & 0 & \dots & A_{1, n+1}^1 - A_1^{12} c_1^2 \\ 0 & A_2^{11} - A_2^{12} c_2^1 & \dots & A_{2, n+1}^1 - A_2^{12} c_2^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{n, n+1}^1 - A_{n, n+1}^2 c_n^1 & A_{n, n+1}^1 - A_{n, n+1}^2 c_n^1 & \dots & A_{n+1} - \sum_{i=1}^n A_{n+1, i}^2 c_i^2 \end{bmatrix}$$

Отметим, что в скользящем режиме отсутствует связь между каналами АСЭС через общий ПИП. Декомпозиция АСЭС, снижение порядка синтезируемой системы, инвариантность и автономность достигнуты за счет добавочных информационных ресурсов – вычисления предписываемых координат в системном центре, разрывных управлений и скользящих режимов.

Условия существования скользящих режимов. Для того, чтобы на поверхностях (линиях) переключения  $S_i=0$  возникли устойчивые скользящие режимы, необходимо выполнение условий их существования (условие устойчивости по второму методу Ляпунова)  $S_i \dot{S}_i < 0 \forall i = \overline{1, n}$ , которые для АСЭС примут вид:

$$\begin{aligned} 0 < (A_i^{21} + A_i^{11} c_i^1 + A_{n+1, i}^1 c_i^2) \tilde{X}_i^1 + (A_i^{22} + A_i^{12} c_i^1 + A_{n+1, i}^2 c_i^2) \tilde{X}_i^2 + \\ + (A_{i, n+1}^2 + A_{i, n+1}^1 c_i^1 + A_{n+1} c_i^2) \tilde{X}_{n+1} + \\ + c_i^2 \sum_{j=1}^n (A_{n+1, j}^1 \tilde{X}_j^1 + A_{n+1, j}^2 \tilde{X}_j^2) + F_{2j} < B_i^2(X_0), \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $X_0$  вычисляется по (3) после подстановки вместо  $u, u_{\text{зад}}$

Анализ (7) показывает, что в статическом скользящем режиме при  $\tilde{X}_i^1 = \tilde{X}_i^2 = \tilde{X}_{n+1} = 0$ , с учетом в (5)  $0 < u = u_{\text{зад}} < 1$  неравенство (7) справедливо.

Следовательно, скользящий режим существует и устойчив, кроме того, верны все предположения, которые сделаны ранее.

$u_{\text{max}}$  определяются из  $S_i=0$  и следующего уравнения

$$\begin{aligned}
 u_{\text{max}} = & |B_i^2(X_0)|^{-1} [(A_i^{21} + A_i^{11}c_i^1 + A_{n+1,j}^1 c_i^2) \tilde{X}_i^1 + \\
 & + (A_i^{22} + A_i^{12}c_i^1 + A_{n+1,j}^2 c_i^2) \tilde{X}_i^2 + \\
 & + (A_{i,n+1}^2 + A_{i,n+1}^1 c_i^1 + A_{n+1} c_i^2) \tilde{X}_{n+1} + \\
 & + c_i^2 \sum_{j=1, j \neq i}^n (A_{n+1,j}^1 \tilde{X}_j^1 + A_{n+1,j}^2 \tilde{X}_j^2) + F_{2i}], \quad i = \overline{1, n}. \quad (8)
 \end{aligned}$$

Для проверки условий (7) в динамике надо решать (2), (4), зная  $\tilde{X}_i^1, \tilde{X}_i^2, \tilde{X}_{n+1}$ , из (6) и параметры возмущений  $V(t), f_{n+1}$ . При разрушении скользящих режимов АСЭС (нарушении (7)) движение АСЭС описывается (5), которое в силу управления  $u_i=1, S_i>0, u_i=0, S_i<0$ , будет направлено на восстановление скользящих режимов.

Т.о., задача синтеза решена за счет локальных разрывных управлений в каналах системы, организации скользящих режимов и вычислений предписываемых координат в системном центре. В скользящем режиме система инвариантна к возмущениям, автономна, а процесс стабилизации выхода обладает желаемым качеством.

**Пример** Рассмотрим решение задачи синтеза разрывного управления по данной методике в трехканальной АСЭС со структурой вида А с базовыми ВИП: понижающего типа с DLC-фильтрами в каналах (рис.2).

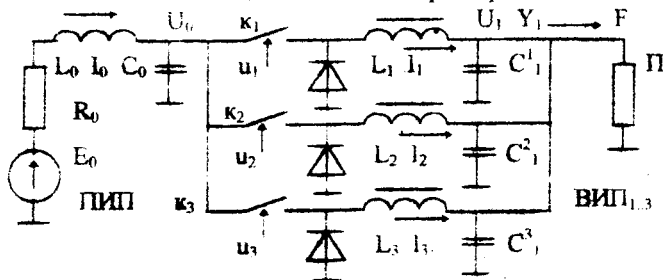


Рис.2. Схема трехканальной АСЭС со структурой вида А

Математическая модель АСЭС записывается в виде:

$$\dot{I}_0 = (E_0 - R_0 I_0 - U_0) / L_0;$$

$$\dot{U}_0 = (I_0 - I_1 u_1 - I_2 u_2 - I_3 u_3) / C_0;$$

$$\dot{I}_1 = (U_0 u_1 - I_1 R_1 - U_1) / L_1;$$

$$I_2 = (U_0 u_2 - I_2 R_2 - U_1) / L_2 ;$$

$$I_3 = (U_0 u_3 - I_3 R_3 - U_1) / L_3 ; \quad (9)$$

$$\dot{U}_1 = (I_1 + I_2 + I_3 - F) / C_1 ;$$

$$Y_1 = U_1 ; \quad Y_2 = I_1 - I_2 ; \quad Y_3 = I_2 - I_3 ;$$

$$u_1 = \begin{cases} 1, S_1 > 0; \\ 0, S_1 < 0; \end{cases} \quad u_2 = \begin{cases} 1, S_2 > 0; \\ 0, S_2 < 0; \end{cases} \quad u_3 = \begin{cases} 1, S_3 > 0; \\ 0, S_3 < 0; \end{cases}$$

где  $U_0, I_0, U_1, I_1, I_2, I_3, E_0, R_0, L_0, C_0, R_1, L_1, R_2, L_2, R_3, L_3, C_1 = C_1^1 + C_1^2 + C_1^3$  — координаты и параметры ПИП и ВИП;  $E_0, F$  — ЭДС и ток нагрузки П (возмущения);  $u_1, u_2, u_3, \kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  — разрывные управления и силовые ключи (коммутаторы);  $Y_1, Y_2, Y_3$  — выходы АСЭС;  $S_1, S_2, S_3$  — функции переключения силовых ключей.

В соответствии с изложенной теорией зададим функции переключения в виде линейной комбинации координат ВИП и их предписываемых значений — заданий (желаемых значений) координат:

$$S_1 = I_1^* - I_1 + b_1 (U_1^* - U_1) = \tilde{I}_1 + b_1 \tilde{U}_1 ;$$

$$S_2 = I_2^* - I_2 + b_2 (U_1^* - U_1) = \tilde{I}_2 + b_2 \tilde{U}_1 ; \quad (10)$$

$$S_3 = I_3^* - I_3 + b_3 (U_1^* - U_1) = \tilde{I}_3 + b_3 \tilde{U}_1 ,$$

где  $I_1^*, I_2^*, I_3^*, U_1^*, \tilde{I}_1, \tilde{I}_2, \tilde{I}_3, \tilde{U}_1$  — задания и отклонения координат ВИП,  $b_1, b_2, b_3$  — искомые коэффициенты закона управления.

Требуется, чтобы координаты  $I_1^*, I_2^*, I_3^*, U_1$  удовлетворяли системе уравнений системного центра:

$$\dot{U}_1^* = (I_1^* + I_2^* + I_3^* - F) / C_1 ; \quad Y_1^* = U_1^* = U_{гр} = \text{const} ;$$

$$Y_2^* = I_1^* - I_2^* = 0 ; \quad Y_3^* = I_2^* - I_3^* = 0. \quad (11)$$

С учетом (11) уравнения АСЭС в отклонениях координат примут вид:

$$\dot{\tilde{I}}_1 = (-U_0 u_1 - \tilde{I}_1 R_1 - \tilde{U}_1 + F_1) / L_1 ;$$

$$\dot{\tilde{I}}_2 = (-U_0 u_2 - \tilde{I}_2 R_2 - \tilde{U}_1 + F_2) / L_2 ;$$

$$\dot{\tilde{I}}_3 = (-U_0 u_3 - \tilde{I}_3 R_3 - \tilde{U}_1 + F_3) / L_3 ;$$

$$\dot{\tilde{U}}_1 = (\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 + \tilde{I}_3) / C_1 ; \quad (12)$$

$$\tilde{Y}_1 = Y_1^* - Y_1 = U_1^* - U_1 = \tilde{U}_1 ;$$

$$\tilde{Y}_2 = Y_2^* - Y_2 = -Y_2 = I_2 - I_1 = -\tilde{I}_2 + I_2^* + \tilde{I}_1 - I_1^* = \tilde{I}_1 - \tilde{I}_2 ;$$

$$\dot{Y}_3 = Y_3^* - Y_3 = I_3 - I_2 = \bar{I}_3 + I_3^* + \bar{I}_2 - I_2^* = \bar{I}_2 - \bar{I}_3,$$

где  $F_1 = L_1 \dot{I}_1^* + I_1^* R_1 + U_1^*$ ,  $F_2 = L_2 \dot{I}_2^* + I_2^* R_2 + U_1^*$ ,  $F_3 = L_3 \dot{I}_3^* + I_3^* R_3 + U_1^*$ .

Из управляемости (12) и стремления  $I_1 \rightarrow I_1^*$ ,  $I_2 \rightarrow I_2^*$ ,  $I_3 \rightarrow I_3^*$ ,  $U_1 \rightarrow U_1^*$  (или  $\bar{I}_1 \rightarrow 0$ ,  $\bar{I}_2 \rightarrow 0$ ,  $\bar{I}_3 \rightarrow 0$ ,  $\bar{U}_1 \rightarrow 0$ ) следует движение  $Y_1 \rightarrow Y_1^*$ ,  $Y_2 \rightarrow Y_2^*$ ,  $Y_3 \rightarrow Y_3^*$ . Кроме того, если существуют скользящие режимы, то система движется по линиям переключения  $S_1=0$ ,  $S_2=0$ ,  $S_3=0$ . Тогда, с учетом (10), система (12) упрощается

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= -b_1 \bar{U}_1; & \bar{I}_2 &= -b_2 \bar{U}_1; & \bar{I}_3 &= -b_3 \bar{U}_1; \\ \bar{U}_1 &= (-b_1 - b_2 - b_3) \bar{U}_1 / C_1; & & & & (13) \\ \bar{Y}_1 &= \bar{U}_1; & \bar{Y}_2 &= (b_2 - b_1) \bar{U}_1; & \bar{Y}_3 &= (b_3 - b_2) \bar{U}_1. \end{aligned}$$

Уравнения (13) в скользящем режиме полностью описывают движение системы. Система (13) инвариантна и автономна от ПИП. Желаемое качество стабилизации напряжения и выравнивания токов в каналах может быть достигнуто выбором  $b_1=b_2=b_3 = -rC_1/3$ , где  $r < 0$  желаемый корень (13). Из (13) при  $t \rightarrow \infty$  из  $\bar{U}_1=0$  следует  $\bar{Y}_1=0$ ,  $\bar{Y}_2=0$ ,  $\bar{Y}_3=0$ , то есть  $U_1=U_1^*=Y_1^*=U_n$ ,  $I_1=I_2$ ,  $I_2=I_3$ .

Таким образом, поставленная задача инвариантной и автономной стабилизации решена.

Для реализации закона управления (10) нужно непрерывно подавать в регулятор значения  $I_1^*$ ,  $I_2^*$ ,  $I_3^*$ ,  $U_1^*$ , которые находятся из решения (11)

$$I_1^* = I_2^* = I_3^* = F/3; \quad U_1^* = Y_1^* = U_n. \quad (14)$$

Состояние ПИП определяется 1,2 уравнениями (9) при  $u_1=u_{1\text{зад}}$ ,  $u_2=u_{2\text{зад}}$ ,  $u_3=u_{3\text{зад}}$ , которые находятся в установившемся скользящем режиме  $S_1=S_2=S_3=\bar{S}_1=\bar{S}_2=\bar{S}_3=0$ ,  $\bar{I}_1=\bar{I}_2=\bar{I}_3=I_1^*=I_2^*=I_3^*=0$ ,  $\bar{U}_1=0$  как  $u_{\text{зад}}=(FR/3 + U_1^*)/U_0$ ,  $\forall i = \bar{1}, \bar{3}$ , из (10), (11), (12). Далее, решая совместно с 1,2(9) получим  $U_0$ . In ПИП для некоторого режима АСЭС определяемого током нагрузки  $F$ .

Условия существования скользящих режимов в каналах АСЭС по  $S, S_i < 0$ ,  $\forall i = \bar{1}, \bar{3}$  для взятых в примере ВИП из (9)-(11) преобразуется в три неравенства

$$0 < (L_i \dot{I}_i^* + I_i^* R_i + U_1^*) / L_i + b_i (I_1^* + I_2^* + I_3^* - I_1 - I_2 - I_3) / C_1 < U_0 / L_i, \quad \forall i = \bar{1}, \bar{3},$$

которые с учетом (14) упрощаются

$$0 < (L_i F/3 + I_i^* R_i + U_1^*) / L_i + b_i (F - I_1 - I_2 - I_3) / C_1 < U_0 / L_i, \quad \forall i = \bar{1}, \bar{3}. \quad (15)$$

В статическом (установившемся скользящем) режиме условия (15) выполняются при  $0 < I_i R_i + U_1^* < U_0$ ,  $\forall i = \bar{1}, \bar{3}$ , что выполняется всегда при  $U_1^* < U_0$ , а в динамике (изменение тока нагрузки со скоростью  $\dot{F}$ ) скользящий режим может нарушаться при крутых фронтах скачков тока нагрузки  $\dot{F}/3$  на один канал. Но если фронт тока нагрузки (в момент

скачка) ограничен или специально ограничить на уровне (без учета малых составляющих)  $-3U_1/L_1 < F < 3(U_0 - U_1)/L_1$ ,  $\forall i = \overline{1,3}$ , то скользящие режимы не разрушаются и новые свойства системы сохраняются. Переходного процесса на выходе АСЭС практически нет. Если фронт тока круче указанных ограничений, то возникает переходный процесс на выходе АСЭС. Движение системы (12) после разрушения скользящего процесса всегда направлено на его восстановление – так выбрано управление. Как только восстанавливается условие  $S_1=S_2=S_3=0$  восстанавливаются скользящие режимы и система движется по линиям  $S_1=S_2=S_3=0$  с желаемым качеством ( $b_1=b_2=b_3=-rC_1/3$ ) в соответствии с (13).

#### Выбор оптимальных коэффициентов $b_1=b_2=b_3$ закона управления.

Для обеспечения максимального быстродействия системы (получения минимального времени переходного процесса  $t_n$ ) необходимо выбирать максимально возможные величины коэффициентов  $b_1, b_2, b_3$  функции переключения  $S_1, S_2, S_3$  закона управления АСЭС, так как  $t_n = -3/r = C_1/b_1$ . Поскольку максимальное быстродействие достигается при максимально больших  $b_1, b_2, b_3$ , то необходимо определить максимально допустимые значения  $b_{1max}, b_{2max}, b_{3max}$ . Необходимо учесть, что желаемое движение системы является эквивалентным движением в скользящем режиме (усредненным движением координат системы пониженного порядка в сторону задания  $U_1^*$  по линиям переключения  $S_1=0, S_2=0, S_3=0$ ), и возможно только в скользящем режиме. Следовательно, значения  $b_{1max}, b_{2max}, b_{3max}$  надо искать из условий существования скользящих режимов в каналах АСЭС (15), где надо положить  $\dot{F}=0, F-i_1-i_2-i_3=\Delta F$  (амплитуда скачка тока  $F$ ), так как нужно определить, восстановится скользящий режим после коммутационного скачка тока нагрузки  $\Delta F$  или нет. После упрощений выражение (15) примет вид

$$0 < (I_1 R_1 + U_1)/L_1 + b_i \Delta F / C_1 < U_0 / L_1; \quad \forall i = \overline{1,3}. \quad (16)$$

Учет знаков для максимальных значений  $\Delta F$  даст

$$b_{1max1} = (U_0 / L_1 - (I_1 R_1 + U_1) / L_1) / (\Delta F_{max1} / C_1); \quad (17)$$

$$b_{1max2} = -((I_1 R_1 + U_1) / L_1) / (\Delta F_{max2} / C_1), \quad \forall i = \overline{1,3},$$

где  $\Delta F_{max1} > 0, \Delta F_{max2} < 0$  - максимальный положительный и максимальный отрицательный скачки тока нагрузки  $F$ .

В регуляторе следует установить равные коэффициенты  $b_{1max} = b_{2max} = b_{3max} = b_{max}$  по правилу

$$b_{max} = \text{MIN}\{b_{1max1}, b_{1max2}\}, \quad \forall i = \overline{1,3}. \quad (18)$$

ориентируясь на минимальный из (17), тогда при любых крутых скачках тока нагрузки скользящий режим во всех каналах будет восстанавливаться сразу после окончания коммутационного процесса (при первом попадании системы на линию переключения) и желаемый вид переходного процесса в системе (процессе стабилизации выходного напряжения АСЭС) останется

неизменным для любых допустимых изменений тока нагрузки. В данном примере вид процесса будет всегда аperiodический с минимально возможным  $t_{\text{min}} = -3/\tau = C_1/b_{\text{max}}$ .

Схема управления (регулятор) конструируется по (10) на сумматорах и компараторах (рис.3), одинаковая для всех трех каналов.

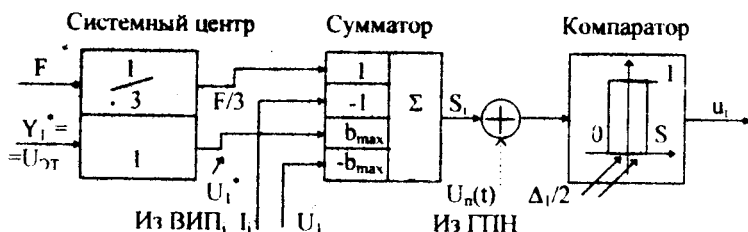


Рис.3. Схема регулятора канала АСЭС и системного центра

Для стабилизации частоты переключений силовых ключей ВИП<sub>13</sub> используются компараторы с регулируемой шириной зоны гистерезиса  $\Delta_1$ . При увеличении  $\Delta_1$  частота переключений в скользящем режиме (при  $\Delta_1=0$ ) стремится к большим значениям) уменьшается и при настройке  $\Delta_1$  устанавливается в нужном диапазоне.

Другой способ фиксации частоты переключений ( $\Delta_1=0$ ) введение режима широтно-импульсной модуляции (ШИМ) при подаче на сумматор на входе компаратора пилообразного симметричного сигнала  $U_n(t)$  (рис.3) необходимой частоты и амплитуды  $2A \geq (2..3)\Delta_1$ , где  $\Delta_1$ -ширина зоны гистерезиса без ШИМ вызывающая желаемую частоту переключений, что необходимо для исключения ложных переключений (соблюдения условия  $\dot{U}_n(t) \geq (2..3)\dot{S}_1$ ). Одновременно обеспечивается наивысшая статическая точность по напряжению, так как линеаризованный коэффициент усиления по контуру напряжения в установившемся псевдоскользящем режиме ШИМ  $b_{\text{max}}K_{\text{шим}} = b_{\text{max}}U_0/(2A)$  близок к максимально возможному и релейные свойства каналов системы при возмущениях (движений системы в «большом» при разрушениях и восстановлениях режима переключений в переходные периоды), и можно осуществить многофазный режим работы каналов (ВИП<sub>13</sub>) если обеспечить фазовый сдвиг  $0^\circ, -120^\circ, -240^\circ$  пилообразных напряжений  $U_n(t)$  подаваемых в регуляторы каналов АСЭС.

Экспериментальное моделирование трехканальной АСЭС (рис.2) с регулятором (рис.3) и параметрами: ПИП –  $E_0=30$  В,  $L_0=10^{-5}$  Гн,  $R_0=0.05$  Ом,  $C_0=10^{-2}$  Ф; ВИП<sub>13</sub> –  $L_1=5 \cdot 10^{-3}$  Гн,  $L_2=10^{-4}$  Гн,  $L_3=7 \cdot 10^{-3}$  Гн,  $R_1=0.01$  Ом,  $R_2=0.02$  Ом,  $R_3=0.015$  Ом,  $C_1=9 \cdot 10^{-4}$  Ф,  $Y_1^*=U_1^*=U_{нТ}=15$  В; регулятор –  $b_{\text{max}}=33$ ,  $\Delta_1=0$ ; ШИМ –  $U_n(t)$ : ( $2A=1.2$  В,  $\omega_0=800000$  р/с); нагрузка  $F=18$  А,  $\Delta F = -9$  А ( $t = 10^{-5}$  с) проведено при помощи пакета VISSIM путем интегрирования (9) по методу Эйлера с шагом  $10^{-7}$  с с управлением (10) и заданиями координат (14). Проведено моделирование системы в режимах:



1) при сбросе нагрузки с  $I=18$  А до  $I=9$  А в момент  $t=10^{-5}$  с с крутым фронтом тока нагрузки  $\Delta I = -9$  А ( $\tau_{\phi}=0$ ); 2) то же с растянутым фронтом тока  $\Delta I = -9$  А ( $\tau_{\phi}=4.1 \cdot 10^{-5}$  с).

Полученные показатели качества напряжения в переходном процессе соответствуют желаемым: вид процесса апериодический, длительность процесса  $t_n = 2.5 \cdot 10^{-5}$  с не превышает желаемого  $t_{n\max} = 3/\tau = C_1/b_{\max} = 2.73 \cdot 10^{-5}$  с. Выброс (отклонение) напряжения  $U_1(t)$  составляет 0.075 В. Если фронт тока нагрузки растянут (при этом условия (15), (16) существования скользких режимов не нарушается) переходный процесс практически отсутствует, что подтверждает теоретические выводы. Статическая точность и пульсации напряжения не хуже 0.002 В. Выравнивание токов каналов в течении  $4 \cdot 10^{-5}$  с высокое.

Для сравнения, определены аналогичные переходные процессы в той же АСЭС с общей обратной связью по отклонению токов дросселей от среднего в каждом канале, с линейным регулятором  $W_k(s) = 41.66(2 \cdot 10^{-5}s + 1) / (5.55 \cdot 10^{-6}s + 1)$ , с параметрами ШИМ –  $U_n(t)$ : ( $2A=12$  В,  $\omega_0=800000$  р/с). Кроме того, определены те же переходные процессы в АСЭС с той же токовой ОС, параметрами ШИМ ( $2A=12$  В,  $\omega_0=800000$  р/с) и регулятором  $W_k(s) = 500(2.5 \cdot 10^{-3}s + 1)(2 \cdot 10^{-5}s + 1) / ((2 \cdot 10^{-2}s + 1)(2.5 \cdot 10^{-6}s + 1))$ .

Сравнительный анализ переходных процессов показывает преимущество разработанного регулятора по качеству стабилизации выходного напряжения по перерегулированию на 2,6.4%, по времени регулирования на 41.60%, по времени выравнивания токов между каналами на 66.200%, по статической точности на 33.100%, по реакции на скачок тока нагрузки с пологим фронтом на 250.450%. Кроме того, разработанный регулятор более устойчив к изменению коэффициента усиления в диапазоне  $\pm 100\%$  ( $b=11.66$ ) – вид переходного процесса по напряжению изменяется незначительно. В то же время при изменении коэффициентов усиления в линейных регуляторах на  $\pm 100\%$  приводит к значительному изменению качества процесса стабилизации – увеличивается время переходного процесса и ухудшается его форма.

В целом эффективность регулятора разработанного по предлагаемой методике в 2.3 раза выше линейных.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение задачи синтеза управления в многоканальных АСЭС с импульсными преобразователями энергии в каналах – в классе разрывных управлений с использованием скользких режимов в каналах и вычислителей (системных центров) для расчета траекторий (желаемых) координат заданий системы. Данный метод сообщает системе новые полезные свойства – инвариантность, автономность, понижение порядка синтезируемой системы, результат – простота построения регулятора и другие преимущества относительно линейного частотного синтеза.

Проведенные теоретические и инженерные исследования и разработки позволили получить следующие основные теоретические и практические выводы и результаты.

1. Модульное или многоканальное построение современных АСЭС с преобразователями энергии в каналах АСЭС позволяет создавать системы различного назначения, мощности, долговечности (надежности) и стоимости для решения конкретных задач электроснабжения автономных объектов. Синтез управления в АСЭС рассмотренных типов (А, Б, В – по разработанной классификации) возможен в рамках синтеза разрывного управления с применением скользящих режимов в каналах АСЭС и формированием желаемой траектории движения координат системы в системном центре, и с использованием всего пространства состояний фильтров преобразователей АСЭС. Применение разработанного управления в модульных и многоканальных АСЭС позволяет повысить структурную надежность АСЭС повысить качество напряжения (относительно линейных регуляторов с ШИМ) на 50..300% и более, повысить надежность управления АСЭС при изменении числа модулей.

2. Синтез разрывного управления с созданием скользящих режимов в каналах АСЭС позволяет (относительно синтеза управления АСЭС частотными методами) достичь желаемого качества процесса стабилизации выходного напряжения (или напряжений) на заданном уровне, автономности каналов, инвариантности процесса к внешним возмущениям и равномерного токораспределения между каналами АСЭС (при параллельном соединении каналов). Процесс расчета регулятора заключается в выборе коэффициентов обратных связей из условия обеспечения желаемого вида характеристического полинома замкнутой системы (модального синтеза) и проводится в эквивалентной системе пониженного порядка. Под желаемым качеством выходного напряжения понимается вид и время переходного процесса по напряжению на выходах АСЭС при максимально допустимых скачкообразных отклонениях тока нагрузки. Применение разработанного для АСЭС разрывного управления на основе скользящих режимов упрощает процесс расчета, изготовления и настройки регулятора.

3. Программная траектория движения координат АСЭС формируется в системном центре, вывод дифференциальных уравнений которого разработан автором. В реальных вычислителях, которые реализуют системные центры, расчет координат заданий обычно производится по алгебраическим уравнениям, являющимися конкретными решениями указанных дифференциальных уравнений системного центра.

4. В АСЭС с суммированием энергии параллельных каналов синтез разрывного управления с использованием всех координат системы и скользящих режимов дает возможность просто решать одновременно задачи устойчивости и равномерного токораспределения между каналами, приводит к инвариантности процесса стабилизации и к автономности

каналов, в смысле отсутствия взаимовлияния каналов через общий источник питания или первичную сеть, – декомпозиции АСЭС от источника питания. Причем декомпозиция в АСЭС достигнута только с использованием дополнительных информационных ресурсов – уравнений системного центра и разрывных управлений.

5. В АСЭС с несколькими независимыми каналами преобразования и распределения энергии синтез разрывного управления на основе скользящих режимов и системного центра допускает получение инвариантности процессов стабилизации выходов АСЭС и автономность (независимость) каналов АСЭС. Кроме того, управления каналами АСЭС формируются в классе децентрализованных (в пространстве координат только «своих» каналов), что приводит к декомпозиции каналов АСЭС от источника питания и друг от друга. В результате задачу синтеза управления в каналах АСЭС можно разделить на независимые локальные задачи синтеза управления в отдельных каналах или модулях.

6. Для практического синтеза управления на локальных уровнях в АСЭС состоящих из импульсных преобразователей различного типа в диссертации разработаны системные центры (в виде предварительных информационных фильтров ВИП) для расчета координат заданий. Использование предварительных фильтров упрощает конструкцию регулятора до простого сумматора. Качественные характеристики таких преобразователей достигают, при разработанной настройке регуляторов, по быстротедействию 90..95% от максимально допустимого (оптимального) быстродействия при максимально допустимом (по амплитуде) скачке тока нагрузки, по статической точности характеристики (при чисто разрывном законе управления) преобразователей близки к астатическим системам (точность выходного напряжения зависит от точности датчиков тока, но не хуже  $\pm \Delta U / (2b_{\max}) \pm \delta F / b_{\max}$ , а при наличии ШИМ – не хуже  $\pm \Delta U / (b_{\max}) \pm \delta F / b_{\max}$  и по виду переходной характеристики – желаемый вид).

7. Разработана методика согласования динамических и энергетических параметров источников питания и преобразовательной части АСЭС, которая снимает вопросы согласования по входным энергетическим ценам ПИП и ВИП, позволяет за счет выбора параметров промежуточных фильтров получать достаточное качество взаимодействия. Разработанные наблюдатели тока дросселя решают вопросы измерения тока дросселя без применения шунтов. В рамках задачи сохранения скользящих режимов в каналах АСЭС решен вопрос о выравнивании токов каналов в переходных режимах для выравнивания показателей надежности каналов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А.С. 1571561 СССР, МКИ G05F 1/46. Импульсный стабилизатор постоянного напряжения/ Л.А. Озеров, О.А. Разнополов, Н.Е. Терентьев Ю.Б. Штессель. – Опубли. в БИ. 1990. № 22

2. А.С. 1295379 СССР, МКИ G05F 1/56. Импульсный стабилизатор постоянного напряжения / В.В. Злакоманов, Л.А. Озеров, О.А. Разнополов, Н.Е. Терентьев – Оpubл. в БИ, 1987, № 9

3. А.С. 1529196 СССР, МКИ G05F 1/56. Релейный стабилизатор постоянного напряжения / А.Н. Кулик, Л.А. Озеров, О.А. Разнополов, Ю.Б. Штессель. – Оpubл. в БИ, 1989, № 48.

4. А.С. 1624428 СССР, МКИ G05F 1/59. Многоканальная система электропитания / Л.А. Озеров, О.А. Разнополов, Ю.Б. Штессель. – Оpubл. в БИ, 1991, № 4

5. Велиш А.В., Озеров Л.А., Разнополов О.А. Синтез управления в импульсных преобразователях энергии постоянного тока // Проектирование автоматических систем и элементов: Сб научн. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1983. – С. 96-97

6. Озеров Л. А., Разнополов О. А., Штессель Ю.Б. Оптимальный регулятор для импульсного стабилизатора напряжения // Информационные и робототехнические системы: Тем. сб. научн. тр. – Челябинск. ЧПИ. 1985. С. 117-118

7. Децентрализованное управление многоканальными системами на основе скользящих режимов / А.Н. Кулик, Л.А. Озеров, О.А. Разнополов и др. // Роботизация, автоматизация и управление: Тезисы докладов X Всесоюзного семинара. – Тбилиси: Изд-во "Мецниცреба". 1986 – С.34-35.

8. Синтез нелинейного регулятора с наблюдателем состояния в системах электропитания автоматических аппаратов / А.Н. Кулик, Л.А. Озеров, О.А. Разнополов, Ю.Б. Штессель // Проблемы комплексного проектирования и испытания энергетических устройств: Темат. сб. научн. тр. – Куйбышев. КуАИ, ЦСКБ. 1986 – Вып.3, ч.1. – С. 23-24.

9. Озеров Л.А., Разнополов О.А., Штессель Ю.Б. Дополнительное управление в задаче синтеза инвариантных разрывных систем // Изв. вузов Сер. Приборостроение. – 1989. – № 7. – С. 20-24.

10. Озеров Л.А., Разнополов О.А., Штессель Ю.Б. Синтез управления импульсным стабилизатором с двухзвенным фильтром на основе скользящих режимов // Электричество. – 1990. – № 7. – С.77-79.

11. Ozerov L.A., Raznopolov O.A., Shtessel Y.B. Sliding Mode Control of Multiple Modular DC-to-DC Power Converters. In Proc. 5th IEEE International Conference on Control Applications Dearborn, MI, September 15-18, 1996, pp. 685-690.

12. Ozerov L.A., Raznopolov O.A., Shtessel Y.B. Synthesis of Decentralized Open-Loop (Pulse) Management of Independent Power Supply Systems. Applied Energy. Russian Journal of Fuel, Power and Heat Systems. Allerton Press, Inc. / New York, Vol.32, № 2, 1994, pp. 105-116.

13. Озеров Л.А., Разнополов О.А., Штессель Ю.Б. Синтез децентрализованного управления в автономных системах электроснабжения // Известия российской академии наук. Энергетика. – 1994. – № 2. – С. 110-121.

14. Озеров Л. А., Разнополов О.А. Синтез разрывного управления в многоканальных автономных системах электроснабжения // Программное обеспечение, микропроцессорная техника сложных автоматических систем и их устройства: Тем. сб. научн. тр. – Челябинск: ЧИТУ, 1995. – С.66–79.

15. Моделирование скользящих режимов управления в автономных электроэнергетических системах / Л.А. Озеров, О.А. Разнополов, Ю.Б. Штессель, А.Ю. Эвнин // Моделирование электроэнергетических систем: Тезисы докладов IX Всесоюзной научной конференции. – Рига: ФЭИ, 1987. – С.117–118.

16. Озеров Л.А., Разнополов О.А., Штессель Ю.Б. Синтез разрывного управления автономными электроэнергетическими системами на основе уравнений системного центра. – Челябинск: ЧПИ. 1988. – 22 с. – Деп. в ИНФОРМЭНЕРГО 31.10.88, № 2942–ЭН88.

17. Озеров Л.А. Синтез релейного управления в вентильном генераторе на основе скользящих режимов с несимметричной поверхностью переключения // Управление и микропроцессорная техника автоматических систем: Тем. сб. научн. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1990. – С.77–79.

18. Озеров Л.А., Разнополов О.А. Синтез децентрализованного управления в автономных системах электроснабжения // Управление в технических системах и электромеханические устройства: Тем. сб. научн. тр. – Челябинск: ЧИТУ, 1993. – С. 29–44.

19. Озеров Л.А. Формирование заданий в задаче синтеза разрывных управлений в импульсных источниках питания с параллельными каналами // Управление и автоматизация проектирования в электроэнергетических системах: Тезисы докладов Всесоюзного семинара "Кибернетика электроэнергетических систем". – Челябинск: ЧПИ, 1990. – С.81–83.

20. Озеров Л.А., Разнополов О.А. Двухуровневая оптимизация автономных электроэнергетических систем на основе скользящих режимов // Декомпозиция и координация в сложных системах: Тезисы докладов Всесоюзной конференции. – Челябинск: ЧПИ, 1986. – С.85–86.

21. К вопросу динамического моделирования взаимодействия при проектировании систем автоматического регулирования / А.В. Велин, А.Н. Кулик, Л.А. Озеров и др. // Межвуз. сб. научн. трудов № 10. – Томск: ГПИ, 1981. – Вып.4. – С. 108–115.

22. А.С. 319249 СССР. Зарегистрировано в ГРИ СССР 1 октября 1990 г. / И.Ю. Козлов, А.А. Куракин, Л.А. Озеров, Ю.Б. Штессель. – Заявка № 4509258.

23. Ozerov L.A., Raznopolov O.A., Shnessel Y.B. Control of Multiple Modulator DC-to-DC Power Converters in Conventional Dynamic Sliding Surfaces. IEEE Transactions on Circuits and Systems, Part I, vol. 45, № 10, 1998, pp. 1091–1101.

ОЗЕРОВ Леонид Алексеевич

СИНТЕЗ РАЗРЫВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ  
АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМОВ

Специальность 05.09.03 –  
«Электротехнические комплексы и системы,  
включая их управление и регулирование»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного  
университета

---

ЛР N 020364 от 10.04.97. Подписано в печать 11.02.99. Формат  
60\*80 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1.  
Тираж 100 экз. Заказ 34/62.

---

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. В.И. Ленина, 76