

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

На правах рукописи

БАРАНОВ Александр Николаевич

СТАБИЛИЗИРУЮЩИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ  
С ДВУХЗВЕННОЙ СТРУКТУРОЙ И СЛЕДЯЩИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Специальность 05.09.12 – Полупроводниковые преобразователи  
электроэнергии

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев 1995

521.314



00388104 (O)

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена в Донбасском горно-металлургическом институте, г.Алчевск.

Научный руководитель - доктор технических наук, с.н.с.  
Пузаков Александр Владимирович

Официальные оппоненты - доктор технических наук, проф.  
Комаров Николай Сергеевич

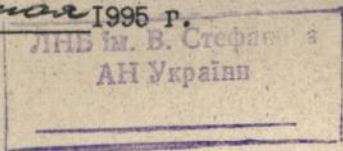
кандидат технических наук, доц.  
Кулешов Юрий Евгеньевич

Ведущая организация - Киевский военный институт  
управления и связи

Защита состоится 27 мая 1995 г. в 11 час. на  
заседании специализированного ученого совета Д 016.30.03 при  
Институте электродинамики НАН Украины (252680, г.Киев-57,  
просп. Победы, 56, спецсовет Д. 016.30.03. Тел. 446-91-15).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Института электродинамики НАН Украины.

Автореферат разослан 17 мая 1995 г.



Ученый секретарь  
специализированного ученого совета,  
доктор технических наук

В.С.Федий

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы и степень исследования тематики диссертации. Преобразователи постоянного напряжения (ППН) относятся к одному из самых многочисленных классов преобразователей электрической энергии. Их разработке, совершенствованию и повышению эффективности работы посвящено большое число публикаций, значительная часть которых относится к ППН, основанным на базовых схемах: понижающей и повышающей. Эти схемы берутся за основу при решении задач регулирования (стабилизации) выходного напряжения в одной из двух зон, находящихся ниже и выше уровня напряжения источника питания.

В ряде случаев, например, при проектировании источников вторичного электропитания для агрегатов бесперебойного питания (АБП) и автономных систем электроснабжения (СЭС), регулирование (стабилизацию) выходного напряжения необходимо осуществлять в обеих вышеназванных зонах. Для этого применяются стабилизирующие ППН, которые традиционно строятся на основе комбинации из двух упомянутых базовых типов ППН (комбинированные ППН), либо путем применения трансформаторных схем различной сложности, включая многоячейковые или дискретные преобразователи.

Однако, из-за определенных недостатков вышеназванных преобразователей, актуальной является задача построения стабилизирующего преобразователя с выходным напряжением как выше, так и ниже уровня напряжения источника питания, обладающего достаточно широким диапазоном регулирования и высокими динамическими, статическими, эксплуатационными и технологическими свойствами.

В последнее время большое внимание специалистов преобразовательной техники уделяется вопросам обеспечения устойчивости, улучшения и оптимизации динамических свойств ПИД. Эти вопросы решаются путем совершенствования методов и устройств управления преобразователями, что во многих случаях позволяет получить дополнительный экономический эффект, зачастую больший, чем от применения самого преобразовательного устройства. В связи с этим, вопросы синтеза систем управления (СУ), обеспечивающих максимальное быстродействие, заданные статические и динамические свойства преобразователей, являются чрезвычайно актуальными.

Целью настоящей работы является разработка и исследование ПИД с возможностью регулирования выходного напряжения как выше, так и ниже напряжения источника питания, а также совершенствование методов и процедур синтеза регуляторов преобразователей для обеспечения заведомо устойчивых и оптимальных режимов работы ПИД со следящим управлением.

Поставленная цель потребовала решения следующих задач:

- разработки методики синтеза алгоритма управления, основанной на динамическом программировании Беллмана, для определенного класса импульсных преобразователей с переменной структурой;
- разработки методики синтеза алгоритма управления импульсным преобразователем с векторными функциями управления;
- анализа влияния изменения коэффициентов обратных связей, полученных в результате синтеза, на динамические характеристики преобразователя и величину интегральной квадратичной ошибки;
- разработки математического и программного обеспечения для синтеза оптимальных регуляторов напряжения и анализа

влияния коэффициентов обратных связей по переменным состояниям фильтра на величину интегральной квадратичной ошибки.

Объектом исследования являются стабилизирующие преобразователи постоянного напряжения с двухзвенной структурой и следящим регулированием.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовались: методы теорий оптимального и экстремального управления; теории автоматического управления; матричные методы; численные методы решения дифференциальных уравнений; методы математического моделирования. Численные расчеты проводились с использованием ПЭВМ типа VT - I60 (AT). Достоверность основных теоретических положений и результатов проверялась с использованием аналогового, численного, полунатурного и физического моделирования, проверкой на экспериментальных образцах преобразователей.

Научная новизна проведенных исследований состоит в следующем:

- показано, что для упрощения процедур синтеза регулятора выходного напряжения двухзвенного ППН первое звено можно представить источником неизменного тока, вследствие чего ППН может рассматриваться в виде системы с постоянной структурой; в результате численного и физического эксперимента установлено, что при значениях пульсаций тока в накопительном дросселе, не превышающих 25-30%, такое допущение не влияет на результаты синтеза;

- показано, что известная методика синтеза регуляторов релейных следящих импульсных преобразователей с постоянной структурой может быть распространена на случай, когда управляющее воздействие входит более чем в одно уравнение системы, описывающей объект управления;

- показано, что при использовании многозвенных фильтров, состоящих из одинаковых звеньев, определяющим влиянием на динамические свойства и интегральную квадратичную ошибку регулирования по входному управляющему воздействию обладают обратные связи по переменным состояниям первого звена.

Теоретическая и практическая ценность проведенных исследований состоит в следующем:

- предложена формализованная методика расчета коэффициентов обратных связей импульсного релейного регулятора преобразователя напряжения, питающегося от источника тока, при обеспечении предельных динамических свойств преобразователя и минимизации интегральной квадратичной ошибки регулирования;

- получены зависимости динамических свойств и интегральной квадратичной ошибки регулирования по входному управляющему воздействию от коэффициентов обратных связей, что позволяет выбрать рациональную структуру регулятора;

- разработан пакет программ для расчета коэффициентов обратных связей по переменным состояниям сглаживающего фильтра двухзвенного преобразователя и анализа влияния этих коэффициентов на динамические свойства преобразователя и величину интегральной квадратичной ошибки, позволяющий существенно сократить время проектирования ППН;

- разработаны новые двухзвенные структуры ППН, обеспечивающие регулирование выходного напряжения как выше, так и ниже уровня напряжения источника питания, и обладающие работоспособностью при коротких замыканиях нагрузки и в режиме холостого хода без принятия специальных мер.

Конкретный личный вклад диссертанта в разработку научных результатов, выносимых на защиту:

- методика синтеза алгоритма управления для определенного класса импульсных преобразователей с переменной структурой;

- методика синтеза алгоритма управления импульсными преобразователями с векторными функциями управления;

- методика и результаты анализа влияния изменения коэффициентов обратных связей, полученных при синтезе, на динамические характеристики преобразователя и величину интегральной квадратичной ошибки.

Реализация результатов работы в народном хозяйстве осуществлялась путем создания единичных образцов преобразовательных устройств для решения нестандартных задач и разработкой образцов для опытного мелкосерийного производства. Отдельные разработки, технические решения и методики использованы по хозяйственным договорам предприятием п/я Г-4891 при создании СЭС подвижной геофизической установки.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: V Всесоюзной конференции "Проблемы преобразовательной техники" (Чернигов, 1991г.), семинарах "Электронные средства преобразования энергии" (Москва, 1990, 1993г.г.), семинаре "Електромагнітна сумісність в системах з транзисторними перетворювачами" научного совета АН Украины по комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики" (Киев, 1994), научно-практической конференции "Наукоємні технології подвійного призначення" (Киев, 1994).

Публикации. Основные результаты работы отражены в 8 печатных работах, в том числе 2 авторских свидетельствах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 141 страницу основного текста, в котором 64

рисунка на 37 страницах, список литературных источников из IZI наименования на 13 страницах и 51 страница приложений.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований. Изложены основные научные и практические результаты, полученные в работе, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе сформулированы основные требования, предъявляемые к стабилизирующим ППН, проведен их краткий анализ и выделены те из них, которые имеют основное значение для исследуемых в диссертационной работе преобразователей.

Проведен обзор существующих в настоящее время принципов построения ППН, способных стабилизировать выходное напряжение на уровне как выше, так и ниже уровня напряжения источника питания, отмечены их достоинства и недостатки. Установлено, что для получения в ППН выходных напряжений как выше, так и ниже уровня питающего напряжения в ряде случаев, например, при построении автономных СЭС и АБП, целесообразно применение многозвенных структур.

Проведен сравнительный анализ способов управления стабилизирующими ППН, в котором особое внимание уделено следящим релейным асинхронным способам, позволяющим оптимизировать динамические свойства преобразователей.

Рассмотрены основные критерии и методы оптимизации режимов работы ППН, обеспечивающие высокое качество выходного напряжения в статических и динамических режимах. Из них предпочтение отдается интегральным квадратичным критериям оптимальности, в частности критерию минимума интегральной квадратичной ошибки, которые позволяют разработать высоко-

формализованную методику синтеза оптимальных регуляторов выходного напряжения для исследуемых преобразователей.

Для синтеза регуляторов, обеспечивающих оптимальные динамические характеристики преобразователя по выбранному критерию качества, наиболее целесообразно применять метод аналитического конструирования регуляторов, базирующийся на динамическом программировании Беллмана.

Вторая глава посвящена синтезу одного из видов ПИИ с переменной структурой (рис. 1), способного стабилизировать выходное напряжение на уровне как выше, так и ниже уровня напряжения источника питания. Показано, что построение стабилизирующего преобразователя можно осуществить путем разделения функций формирования тока в накопительном дросселе  $L$  и формирования выходного напряжения между различными ключевыми элементами  $VT_1$  и  $VT_2$  (соответственно пропорционально сигналу задания тока  $U_{зт}$  и сигналу задания напряжения  $U_{зн}$ ) с использованием следящего управления.

Отличительной особенностью рассматриваемого ПИИ является то, что он строится путем последовательного соединения преобразователя "напряжение-ток" ("Н-Т") и преобразователя "ток-напряжение" ("Т-Н"), т.е. имеет двухзвенную структуру "Н-Т"- "Т-Н", с организацией двух контуров регулирования. Для управления силовыми ключами в каждом преобразователе (контуре регулирования) используются релейные регуляторы тока РТ и напряжения РН, которые через буферные усилители БУ1 и БУ2 управляют силовыми ключами  $VT_1$  и  $VT_2$ . Использование следящего релейного асинхронного принципа управления позволяет, кроме упрощения структуры СУ, оптимизировать динамические свойства преобразователей.

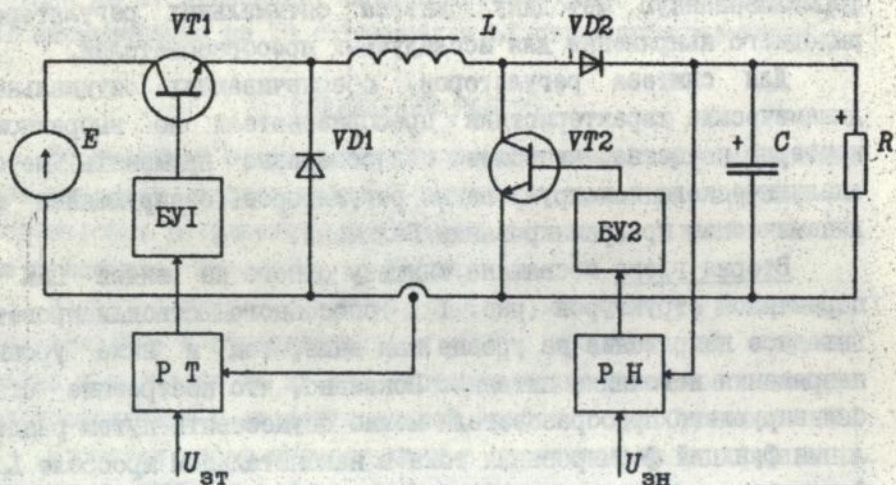


Рис. I

В главе обоснована возможность представления такого преобразователя системой с постоянной структурой, что позволяет упростить дальнейшую процедуру синтеза регуляторов напряжения для оптимизации динамических свойств преобразователя, а также анализ его устойчивости и динамики. Приведены результаты численных и экспериментальных исследований, которые показали, что при значениях пульсаций тока в накопительном дросселе, не превышающих 25–30%, такое представление допустимо и не вносит ощутимой погрешности.

В третьей главе решается задача синтеза оптимальных регуляторов выходного напряжения для стабилизирующего ПН с двухзвенной структурой. Такую задачу позволяет решить метод динамического программирования Беллмана с использованием

функции Ляпунова. Методика, основанная на этом методе, была разработана и эффективно применялась для понижающих ППН. Достоинством применения такой методики является то, что при использовании квадратичных функционалов качества функция Беллмана совпадает с функцией Ляпунова, что позволяет получить заведомо устойчивую систему регулирования непосредственно во время синтеза, не требуя дополнительной проверки.

В отличие от известной методики, при синтезе регуляторов напряжения стабилизирующих ППН с двухзвенной структурой, управляющим воздействием является не напряжение, а ток. Это становится очевидным после представления первого звена двухзвенного ППН источником постоянного тока, а всего ППН системой с постоянной структурой, после чего процедура синтеза оптимальных регуляторов могла бы быть сведена к известной методике. Однако во время синтеза установлено, что в данном преобразователе управляющее воздействие (входной ток) входит в два уравнения системы дифференциальных уравнений, описывающих объект управления. Для устройств преобразовательной техники такая ситуация ранее не возникала, что потребовало разработки методики синтеза, обобщающей известную методику на случай, когда управляющее воздействие является векторной функцией, а не скаляром, как в известной методике.

Разработанная методика позволила получить аналитические выражения для оптимального управления (в смысле минимума интегральной квадратичной ошибки) для стабилизирующих преобразователей двухзвенной структуры с фильтрами третьего и пятого порядков. Полученные выражения однозначно определяют структуру и параметры регулятора выходного напряжения и преобразователя как замкнутой системы по переменным состояниям силовой части схемы.

Четвертая глава посвящена исследованиям, которые проведены с целью проверки достижения цели синтеза оптимальных регуляторов напряжения стабилизирующих ПН двухзвенной структуры и анализа их динамики. Здесь, на специально разработанных математических моделях, проверяется, насколько алгоритмы управления, синтезированные в главе 3, обеспечивают минимум интегральной квадратичной ошибки выходного напряжения от заданного значения. При этом одновременно проводится проверка устойчивости и динамики синтезированных ПН при изменениях коэффициентов обратных связей по переменным состояния фильтра. Это потребовало анализа влияния каждого из рассчитанных коэффициентов обратных связей на величину интегральной квадратичной ошибки по входному управляющему воздействию и разработки соответствующей методики, т.к. подобный анализ проводился впервые.

Проведенный анализ позволил получить зависимости величины интегральной квадратичной ошибки от коэффициентов обратных связей, которые дают возможность выбрать рациональную структуру регулятора. Показано, что при использовании многозвенных фильтров, состоящих из одинаковых звеньев, наибольшее влияние на динамические свойства и интегральную квадратичную ошибку по входному управляющему воздействию оказывают обратные связи по переменным состояния первого звена.

Результаты моделирования подтверждены экспериментальными данными, полученными при исследовании физических макетов преобразователей.

В пятой главе рассмотрены вопросы практического конструирования преобразователей двухзвенной структуры и релейных следящих регуляторов.

13

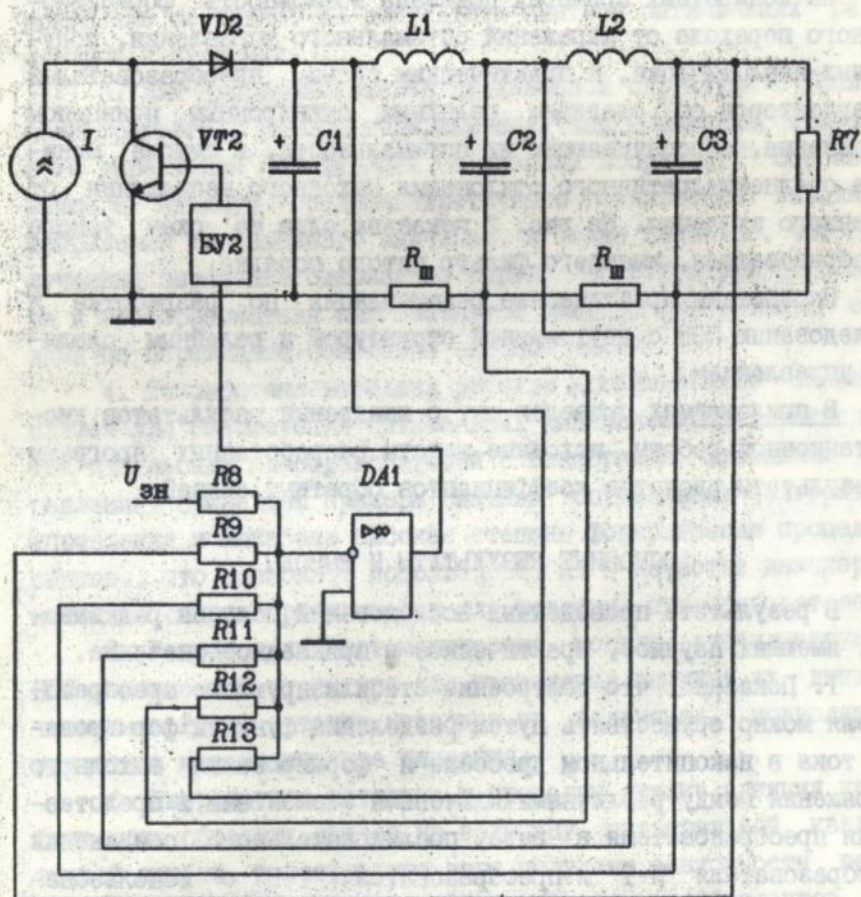


Рис. 2

На конкретных примерах показана возможность формализованного перехода от выражений оптимального управления, полученных аналитически, к практическим схемам преобразователей и регуляторов со следящим релейным асинхронным принципом управления, обеспечивающим их оптимальность, в смысле минимума среднеквадратичного отклонения выходного напряжения от заданного значения. На рис. 2 показана одна из схем такого преобразователя, имеющего фильтр пятого порядка.

Выработаны практические рекомендации по разработке и исследованию ППН с двухзвенной структурой и релейным следящим управлением.

В приложениях приведен акт о внедрении результатов диссертационной работы, исходные тексты разработанных программ и результаты расчетов коэффициентов обратных связей.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований получен ряд выводов, имеющих научное, практическое и прикладное значение.

1. Показано, что построение стабилизирующего преобразователя можно осуществить путем разделения функций формирования тока в накопительном дросселе и формирования выходного напряжения между различными ключевыми элементами и представления преобразователя в виде последовательного соединения преобразователя "Н-Т" и преобразователя "Т-Н" с использованием в каждом из них следящего релейного управления.

2. Показано, что для упрощения процедур анализа и синтеза стабилизирующего ППН с двухзвенной структурой первое звено преобразователя можно представить источником неизменного тока, а также установлено, что при значениях пульсаций тока в накопительном дросселе, не превышающих 25-30%, такое

допущение не влияет на результаты синтеза оптимальных регуляторов напряжения.

3. Для преобразователей двухзвенной структуры с фильтрами третьего и пятого порядков получены выражения оптимального управления как функции от фазовых координат, обеспечивающего минимум среднеквадратичного отклонения выходного напряжения от заданного значения, а также показано, что полученные выражения однозначно определяют структуру регулятора и преобразователя как замкнутой системы с обратными связями по переменным состояния силовой части.

4. Разработана методика расчета коэффициентов обратных связей для обеспечения оптимальных динамических характеристик импульсных преобразователей с векторными функциями управления. Приведены примеры синтеза оптимальных алгоритмов управления и показана высокая степень формализации процедуры синтеза, что позволяет использовать их в качестве инженерной методики синтеза регуляторов для подобных преобразователей.

5. Разработаны математические модели стабилизирующих ПИД двухзвенной структуры для проведения анализа их динамических свойств, а также методика их получения, позволяющая упростить математическое описание.

6. Разработана методика и проведен анализ влияния коэффициентов обратных связей на величину интегральной квадратичной ошибки, в результате чего получены зависимости величины интегральной квадратичной ошибки от коэффициентов обратных связей по переменным состояния силовой части ПИД, которые позволяют выбрать рациональную структуру регулятора.

7. Показано, что при использовании многозвенных фильтров, состоящих из одинаковых звеньев, определяющим влиянием на динамические свойства и интегральную квадратичную ошибку

по входному управляющему воздействию обладают обратные связи по переменным состояниям первого звена.

8. Приведены примеры практической реализации преобразователей со следящим релейным асинхронным принципом управления, обеспечивающим оптимальные динамические характеристики, в смысле минимума среднеквадратичного отклонения выходного напряжения от заданного значения, а также выработаны практические рекомендации по разработке и использованию ППН с двухзвенной структурой и релейным следящим управлением.

#### Основные публикации по теме диссертации

1. Пузаков А.В., Баранов А.Н. Построение широкорегулируемых преобразователей постоянного напряжения на основе двухзвенной структуры // Техн. электродинамика. - 1994. - №2. - С. 16-20.

2, А. с. 1714531 СССР, МКИ G01R 23/02 Способ преобразования частоты в напряжение / А.В.Пузаков, А.Н.Баранов. 23.02.92. Бюл. № 7.

3. Патент 1835121 СССР, МКИ H02M 7/48 Способ управления преобразователем постоянного напряжения в переменное многоступенчатое / А.В.Пузаков, А.Н.Баранов, В.Г.Глазков. 15.08.93. Бюл. №30.

4. Пузаков А.В., Баранов А.Н. Новые структуры генераторов ведущего сигнала модуляционных преобразователей переменного напряжения // Электронные средства преобразования электрической энергии: Материалы семинара. - М.: НТЦ "Информтехника", 1990. - С. 31-33.

5. Пузаков А.В., Баранов А.Н., Глазков В.Г. Методы построения многоячейковых транзисторных формирователей переменного напряжения // Проблемы преобразовательной техники: Тез.

докл. V Всесоюзной науч.-техн. конф.- Киев: ИЭД АН УССР, 1991.- Ч.4.- С. 165-166.

6. Пузаков А.В., Баранов А.Н., Глазков В.Г. Построение импульсного стабилизатора напряжения следящего типа на основе релейной автоколебательной системы// Электронные средства преобразования электрической энергии: Материалы семинара.- М.: НТЦ "Информтехника", 1993.- С. 39-41.

7. Баранов А.Н., Глазков В.Г. Особенности построения инвертирующих преобразователей напряжения// Электронные средства преобразования электрической энергии: Материалы семинара.- М.: НТЦ "Информтехника", 1993.- С. 42-44.

8. Пузаков О.В., Баранов О.М., Глазков В.Г. Високодинамічні транзисторні формувачі постійної та змінної напруги для систем безперебійного та бортового електроживлення// Наукові технології подвійного призначення: Тез. доп. Наук.-практ. конф.- Київ: КДУ, 1994.- С. 69.

Личный вклад соискателя в работах, написанных в соавторстве, состоит в следующем: в работах /1, 7/ предложены схемотехнические принципы построения преобразователей, проведен синтез регуляторов выходного напряжения; в /4, 5/ разработаны методы синтеза выходных напряжений; в /6/ предложена схемотехническая реализация алгоритмов управления; в /8/ предложены методы построения высокочастотных преобразователей постоянного напряжения; в /2, 3/ вклад определен справками о творческом участии.

Соискатель

*А.Н. Баранов*

А.Н. Баранов

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

Баранов О.М. Стабілізуючі перетворювачі постійної напруги з дволанковою структурою та слідкучим регулюванням.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 - напівпровідникові перетворювачі електроенергії, Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 1995.

Захищається 6 наукових праць, авторське свідоцтво та патент, які мають теоретичні та експериментальні дослідження стабілізуючих перетворювачів постійної напруги з дволанковою структурою та слідкучим регулюванням. Установлено, що такі перетворювачі можна розглядати як системи з постійною структурою та векторними функціями керування, що спрощує процедуру синтезу регулятора вихідної напруги і за реальними умовами не впливає на результати синтезу.

Baranov A.N. Stabilizing constant-voltage converters with double-unit structure and following control.

Dissertation for seeking of a Candidate of Science Degree on 05.09.12. speciality - semiconductor converters of electric energy, Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1995.

Defend 6 scientific works and 2 patents, which contain theoretical and experimental research of stabilizing constant-voltage converters with double-unit structure and following control. It is established, such converters can be regarded as systems with constant structure and vector control functions, that simplifies the synthesis procedure of output voltage regulator and does not effect the synthesis results under real conditions.

Ключові слова: стабілізуючий перетворювач, дволанкова структура, слідкуче регулювання.

Подписано к печати 23.03.1995г.  
Бумага офсетная. Усл.-печ. лист. 1,0  
Тираж 100. Заказ 170. Бесплатно

Формат 60x84/16  
Уч.-изд. лист 1,0

---

Полиграф. уч-к Института электродинамики НАН Украины,  
252057, Киев-57, проспект Победы, 56

901 0111

AB 32.430

**AB 32.430**