

Семейство статических преобразователей напряжения нового поколения

Современная концепция построения функциональных узлов и системных семейств силовой электроники

Техническое решение по созданию семейства статических преобразователей напряжения основано на новой концепции. Базируясь на последних достижениях в системотехнике и схемотехнике силовой электроники, предлагаемое решение сдвигается в сторону информатики. Это обусловлено использованием в устройствах управления современными статическими преобразователями микропроцессорной техники самого различного вида — от микроконтроллеров до цифровых сигнальных процессоров, что, в свою очередь, повышает не только функциональные возможности управления, но и требования к самой системе управления.

Владимир Силкин

Sivlan@rambler.ru

Задача и технические требования, предъявляемые к разрабатываемой системе

Создание семейства статических преобразователей однофазного и трехфазного напряжения на основе унифицированной базовой ячейки (УБЯ) с цифровым управлением является общей задачей, для решения которой необходимо выбрать нужный вариант построения системы, алгоритм управления и элементную базу. Кроме этого, следует рассмотреть возможность использования данной методики применительно к другим видам силовой электроники. Для наглядности предложено конкретное техническое задание.

Электрические требования

Требуемые электрические параметры преобразователей приведены в таблице.

Таблица. Электрические параметры преобразователей

Наименование параметра	Численное значение	
	СПТ	СПО
1. Номинальное выходное напряжение синусоидальной формы (действующее значение), В	230	
2. Пределы изменения выходного напряжения при изменении нагрузки 0–100%, %, не более	±2	
3. Пределы изменения выходного напряжения при изменении нагрузки 50–100%, %, не более	±1,5	
4. Низкочастотная модуляция выходного напряжения, %, не более	0,2	
5. Номинальная выходная мощность, кВт	30	8
6. Число фаз выходного напряжения	3	1
7. Частота выходного напряжения, Гц	400	
8. Пределы изменения частоты выходного напряжения при изменении нагрузки 0–100%, %, не более	±1	
9. Разность линейных напряжений при холостом ходе и симметричной нагрузке, %, не более	2	
10. Коэффициент нелинейных искажений формы выходного напряжения, %, не более	5	
11. Коэффициент мощности нагрузки, не менее	0,8	
12. КПД, не менее	0,8	
13. Диапазон срабатывания схемы защиты от перегрузки по току и к.з. по выходу, % от номинального тока нагрузки	120–130	
14. Время установления напряжения, с, не более	5	

Функциональные требования

Разрабатываемая система должна обладать всеми защитными функциями и функциями наблюдения, характерными для современных систем силовой электроники:

1. Контроль уровня входного напряжения и уровня промежуточного и выходного напряжения преобразователя.
2. Контроль уровня входного и выходного тока преобразователя.
3. Защита от токовой перегрузки.
4. Защита от режима короткого замыкания.
5. Температурная защита.

Для реализации возможности параллельной работы силовых элементов и возможности трехфазного построения система также должна выполнять функции динамического выравнивания токов выходных силовых ключей и синхронизации работы силовых элементов.

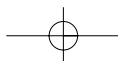
Конструктивные требования

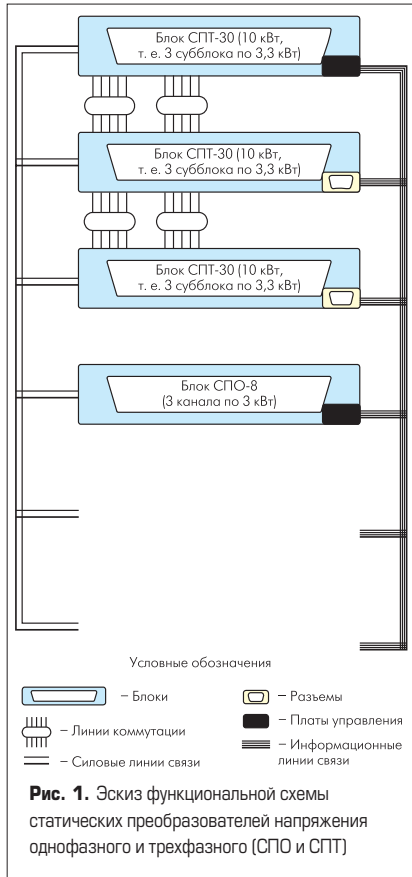
1. Предъявляемые ограничения по габаритам в плане 600×600 мм.
2. Предъявляемые ограничения по высоте — 600 мм.

Системное определение варианта построения статических преобразователей напряжения

В работе рассматривается часть системы, а именно унифицированная базовая ячейка, созданная на основе схемы инвертора напряжения, питаемой выпрямленным напряжением сети, поскольку данный участок системы является «кирпичом», из которого построено наше сооружение.

В качестве базового предлагается вариант построения системы статических преобразователей, приведенный на рис. 1.





Предлагаемый вариант логически вытекает из осмысления технических требований поставленной задачи. Рассмотрим это подробнее. Необходимо разработать трехфазный статический преобразователь мощностью 30 кВт и однофазный мощностью 8 кВт. Поставленная задача подразумевает возможность (или даже необходимость) параллельного включения какого-то минимального элемента. Если найти приблизительно наименьшее общее кратное, оно будет равно 3,3 кВт. То есть предлагаемый вариант соответствует рис. 1: три трехфазных блока по 10 кВт (в каждом по три субблока мощностью 3,3 кВт) и один однофазный блок мощностью 8 кВт (состоит из трех субблоков по 3,3 кВт с избыточной мощностью).

Приведенная система позволяет использовать: глубокую внутреннюю унификацию; параллельное включение трехфазных блоков (СПТ) и однофазных каналов (СПО); наращивание и снижение мощности статических преобразователей.

Рассмотрим вышесказанное по пунктам.

1. Унификация заключается в том, что блоки СПТ и СПО можно собирать на одной печатной плате, с одинаковыми навесными элементами, при незначительном изменении в коммутации (в основном, в сильноточной части) и в комплектации.
2. Параллельное включение блоков СПТ и каналов СПО возможно при использовании в качестве силовых ключей IGBT-транзисторы с положительным коэффициентом напряжения насыщения. Кроме этого, динамическое выравнивание токов

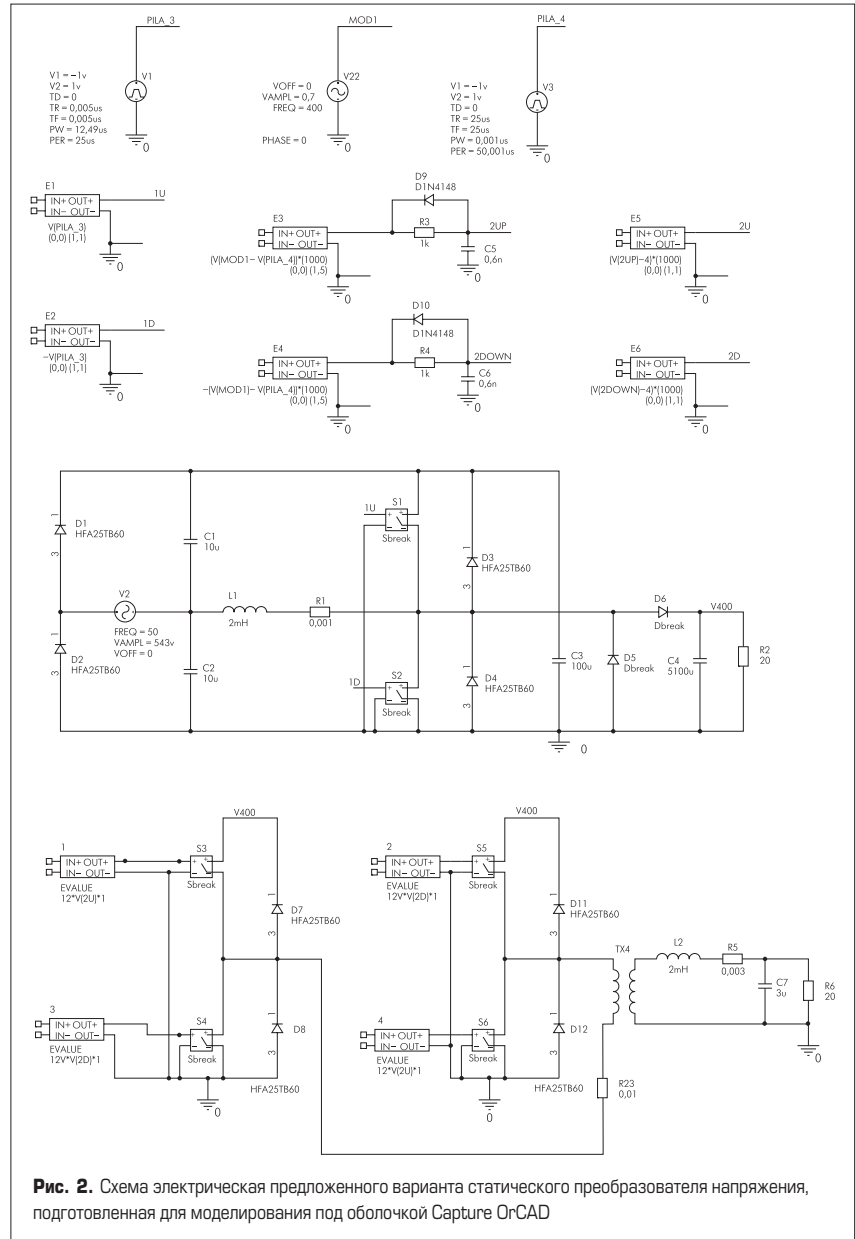


Рис. 2. Схема электрическая предложенного варианта статического преобразователя напряжения, подготовленная для моделирования под оболочкой Capture OrCAD

и балансировка фаз возложены на систему управления.
 3. Вследствие параллельного включения блоков и каналов предлагаемая структура построения статических преобразователей напряжения подразумевает возможность легко наращивать и снижать мощность статических преобразователей. Данный вариант представляет собой систему построения статических преобразователей напряжения на основе унифицированной базовой ячейки (УБЯ). Она является законченным блоком, выполняющим функции выпрямителя входного напряжения переменного тока, корректора коэффициента мощности, стабилизатора постоянного напряжения, преобразователя постоянного напряжения в переменное и стабилизатора выходного напряжения переменного тока (с функцией корректора формы выходного напряжения). Еще одно неоспоримое достоинство этого решения — возможность

варьировать мощность УБЯ. Соответственно, можно системно строить различные семейства статических преобразователей, перекрывая все функциональные и параметрические ряды.

Выбор структуры схемотехнического построения ячейки, краткое теоретическое обоснование и пояснения на основании результатов моделирования

В качестве подтверждения приводимых решений предлагается анализ публикаций по этой тематике, расчеты и результаты моделирования.

Схема построения унифицированной базовой ячейки логически связана с заявленными функциями. То есть функции выпрямителя входного напряжения переменного тока, корректора коэффициента

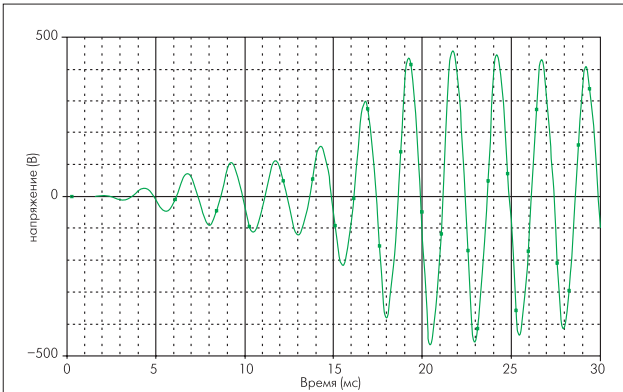
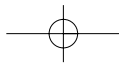


Рис. 3. Эюра выходного напряжения схемы, приведенной на рис. 2

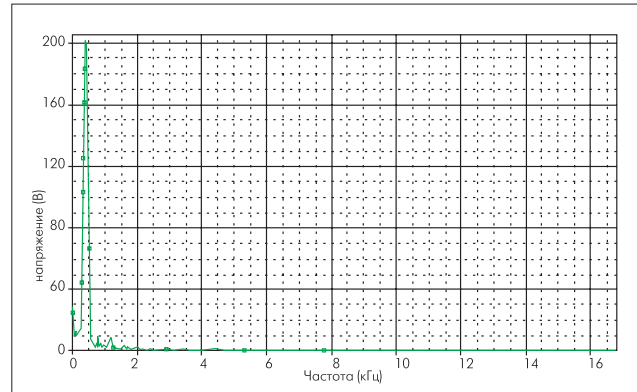


Рис. 4. Спектральный состав выходного сигнала

мощности, стабилизатора постоянного напряжения мы возлагаем на плавающий полумостовой повышающий (ППП) преобразователь [2]. Функции преобразователя постоянного напряжения в переменное и стабилизатора выходного напряжения переменного тока (с функцией корректора формы выходного напряжения) мы реализуем на хорошо известной схеме полномостового инвертора. Схема, подготовленная

для моделирования в среде OrCAD 9.2, приведена на рис. 2.

Выбранный вариант построения, безусловно, не единственный, но он полностью удовлетворяет поставленным функциональным и параметрическим требованиям. Это всецело подтверждают результаты моделирования. Эюра выходного напряжения приведена на рис. 3.

Спектральный состав данного сигнала показан на рис. 4. Все представленные материалы доказывают правильность сделанного выбора.

Для подтверждения правильности выбранного решения достаточно представленных результатов, а для разработки принципиальной электрической схемы и выдачи технического задания на расчет и разработку трансформатора и дросселей потребуется

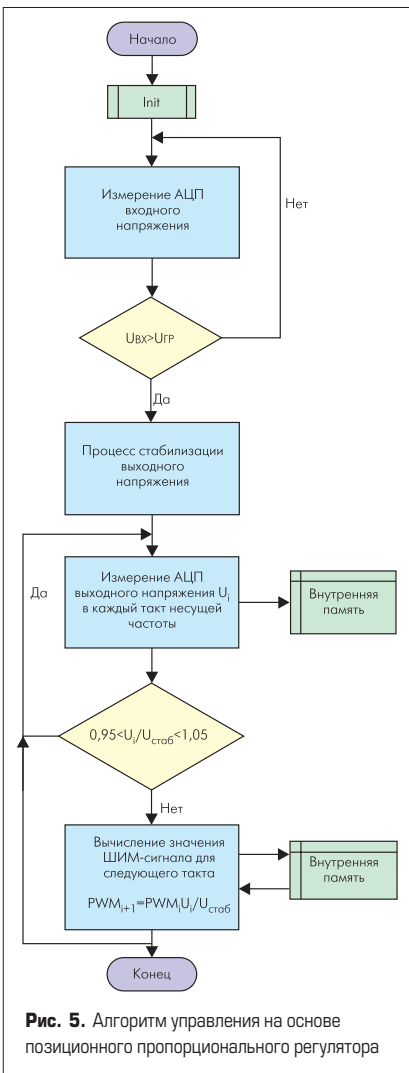


Рис. 5. Алгоритм управления на основе позиционного пропорционального регулятора

Комплекс алгоритмов управления статическим преобразователем напряжения

Предлагаемый комплекс алгоритмов управления полностью подтверждает выполнение функциональных требований. Алгоритм управления первым звеном, основанный на пропорциональном позиционном регуляторе, показан на рис. 5.

Алгоритм динамического регулирования выходного тока (рис. 6) раскрывает дополнительные функциональные возможности:

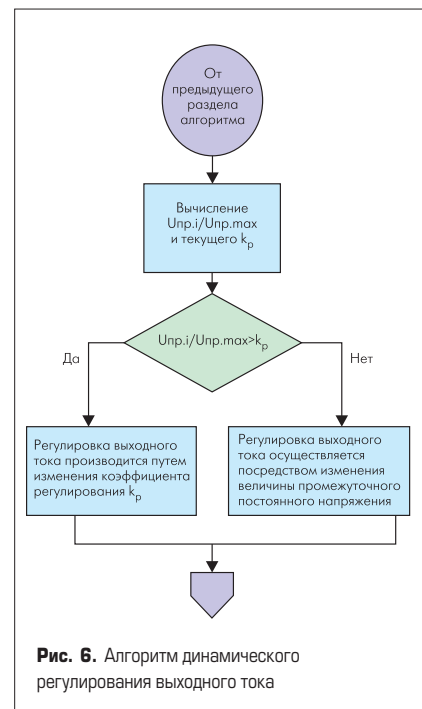


Рис. 6. Алгоритм динамического регулирования выходного тока

- динамическое выравнивание выходного тока при параллельном включении;
- динамическое регулирование выходного тока при его неаварийном изменении.

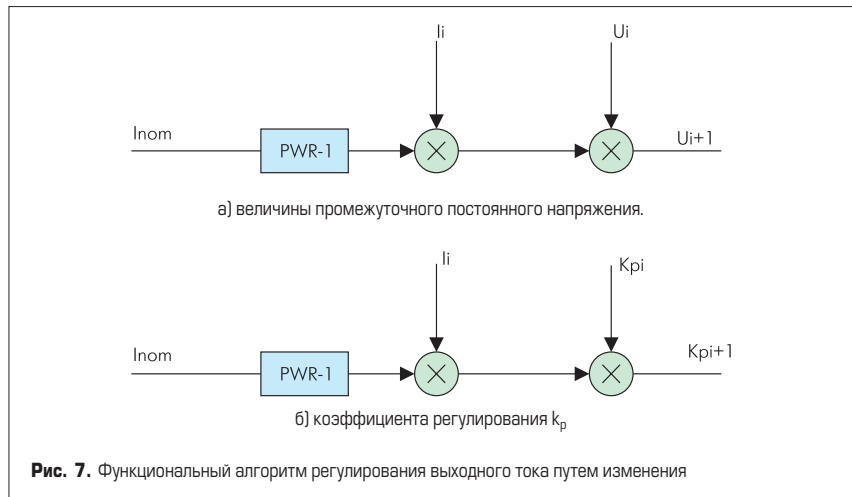
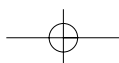
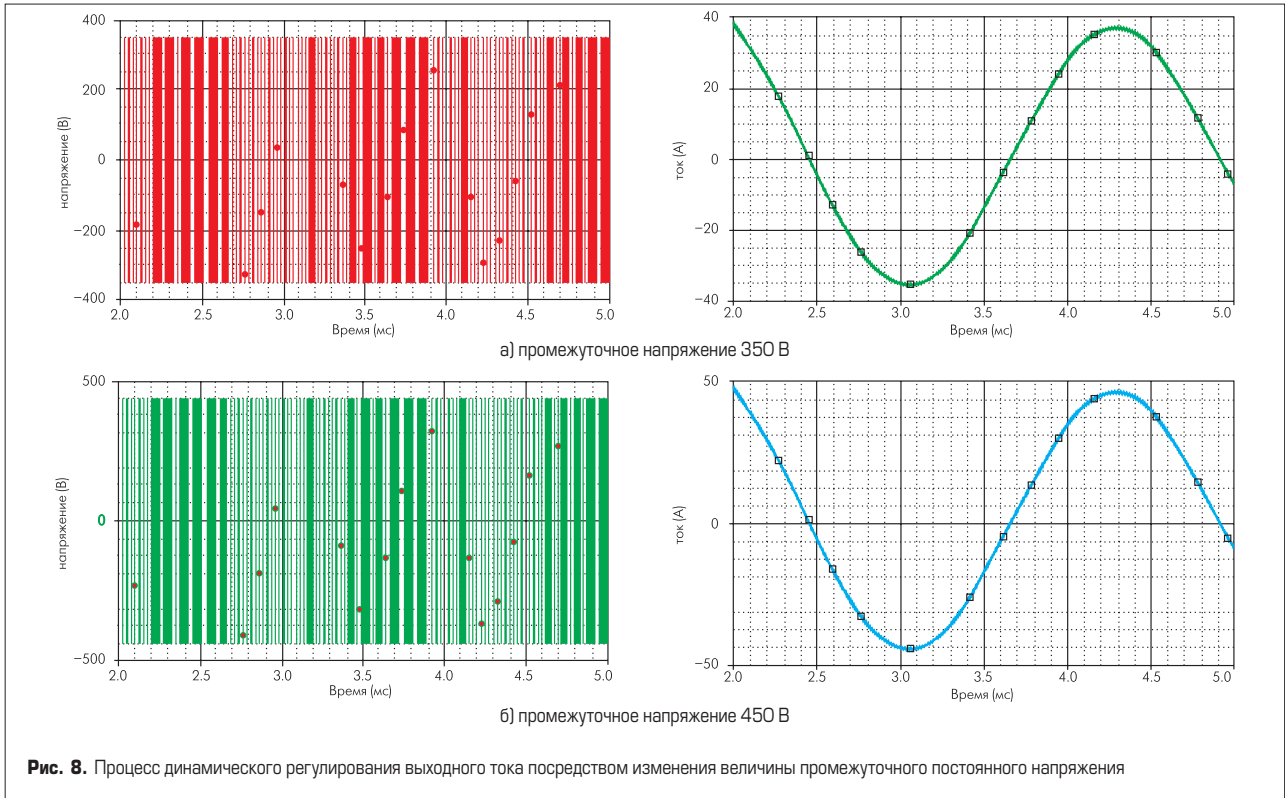
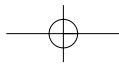


Рис. 7. Функциональный алгоритм регулирования выходного тока путем изменения





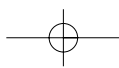
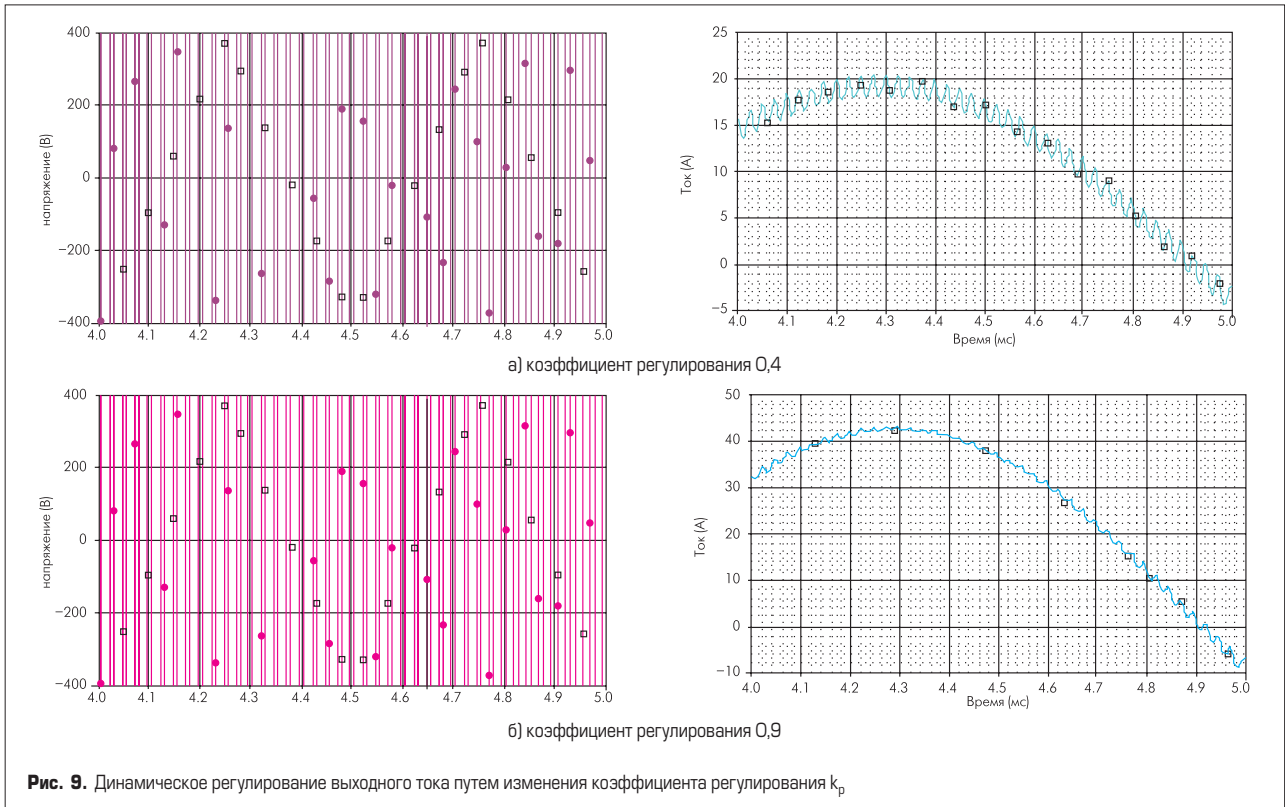
За основу принята суперпозиция двух возможных вариантов динамического изменения выходного тока: путем изменения или величины промежуточного постоянного напряжения, или коэффициента регулирования k_p . Функциональный алгоритм регулирования выходного тока посредством измене-

ния величины промежуточного постоянного напряжения, подготовленный под оболочкой Capture, представлен на рис. 7а.

Функциональный алгоритм регулирования выходного тока путем изменения коэффициента регулирования k_p , подготовленный под оболочкой Capture, представлен на рис. 7б.

На рис. 8 изображен динамический рост величины выходного тока от 37 до 48 А при изменении значения промежуточного постоянного напряжения от 350 до 450 В.

На рис. 9 показано, как изменение коэффициента регулирования k_p от 0,4 до 0,9 приводит к росту величины выходного тока от 19 до 41 А.



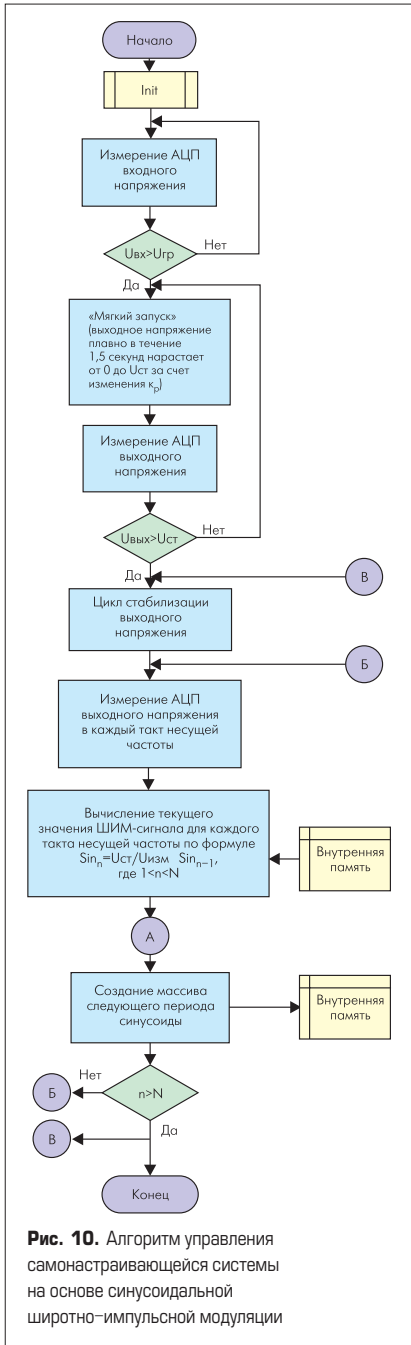
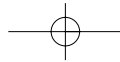


Рис. 10. Алгоритм управления самонастраивающейся системы на основе синусоидальной широтно-импульсной модуляции

Алгоритм управления вторым звеном на базе самонастраивающейся системы, основанный на синусоидальной широтно-импульсной модуляции, приведен на рис. 10. В этом алгоритме применен метод стабилизации выходного напряжения (с функцией корректора формы выходного напряжения), когда для каждой точки дискретизации периода измеряют выходное напряжение в этой точке. Используя данные по выходному напряжению, можно вычислить значение длительности ШИМ-сигнала для следующего кванта времени.

Описание работы комплекса алгоритмов управления в режиме коррекции формы выходного напряжения

Рассмотрим работу представленной схемы на емкостной выпрямитель (рис. 11). Дан-

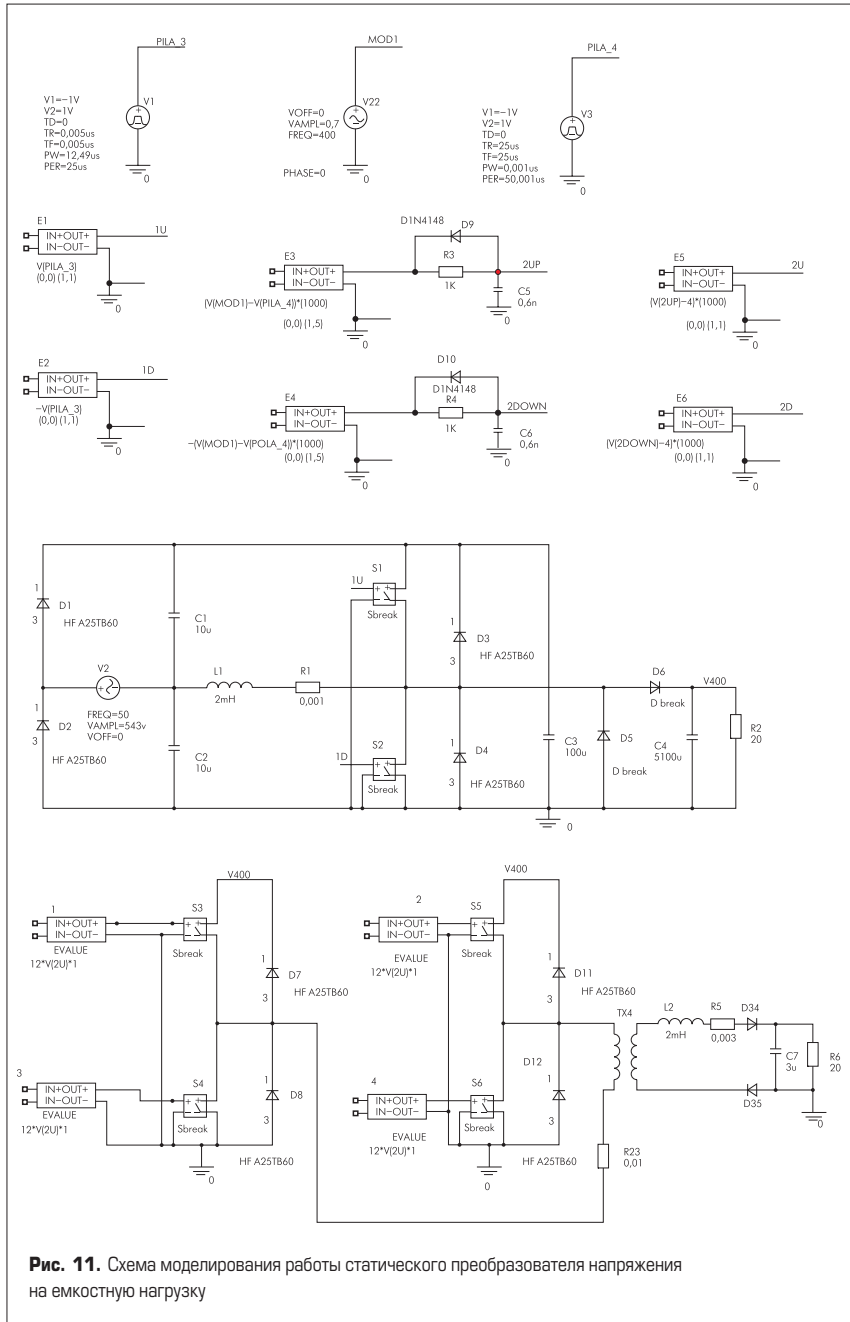


Рис. 11. Схема моделирования работы статического преобразователя напряжения на емкостную нагрузку

ный вариант работы статических преобразователей напряжения встречается достаточно часто. Но самое главное, такой вариант характеризуется максимальными искажениями формы выходного сигнала. Таким образом, это наиболее наглядное представление возможностей алгоритма в плане коррекции формы выходного напряжения.

Некорректированное выходное напряжение схемы при работе на емкостной выпрямитель (рис. 12).

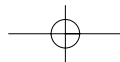
На рисунке видно, что, несмотря на правильную форму ШИМ-сигнала, форма выходного низкочастотного сигнала искажена. Это позволяет построить концепцию коррекции формы выходного напряжения на основе изменения ШИМ-сигнала пропорционально отличию реального сигнала относительно идеального. В алгоритме управления

использован метод стабилизации выходного напряжения (с функцией корректора формы выходного напряжения), когда для каждой точки дискретизации периода измеряют выходное напряжение в этой точке [3].

Представленные результаты доказывают жизнеспособность предложенных методов.

Использование комплекса алгоритмов управления для предотвращения насыщения выходного трансформатора

Представленный комплекс алгоритмов позволяет предотвратить насыщение сердечника выходного трансформатора. Действительно, сердечник рассчитывается так, чтобы не войти в область насыщения при номинальном значении выходного напряжения с запасом, необходимым не только для коррекции формы выходного напряжения, но и для предотвращения аварийных



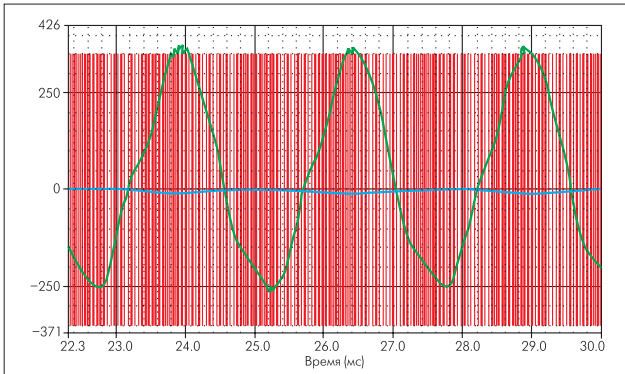
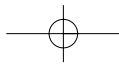


Рис. 12. Эпюры выходного напряжения, напряжения ШИМ-сигнала и выходного тока схемы при работе на емкостной выпрямитель

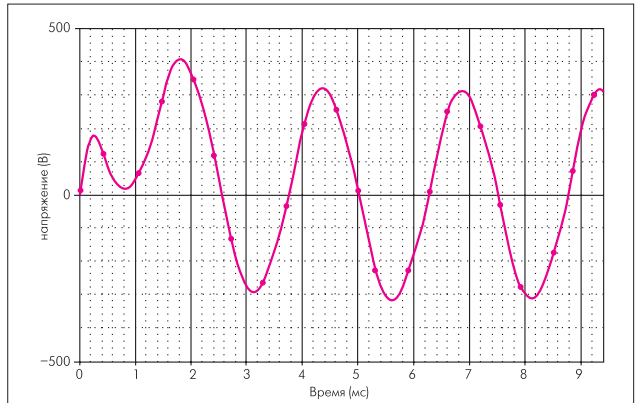


Рис. 14. Выходное напряжение моделируемой схемы

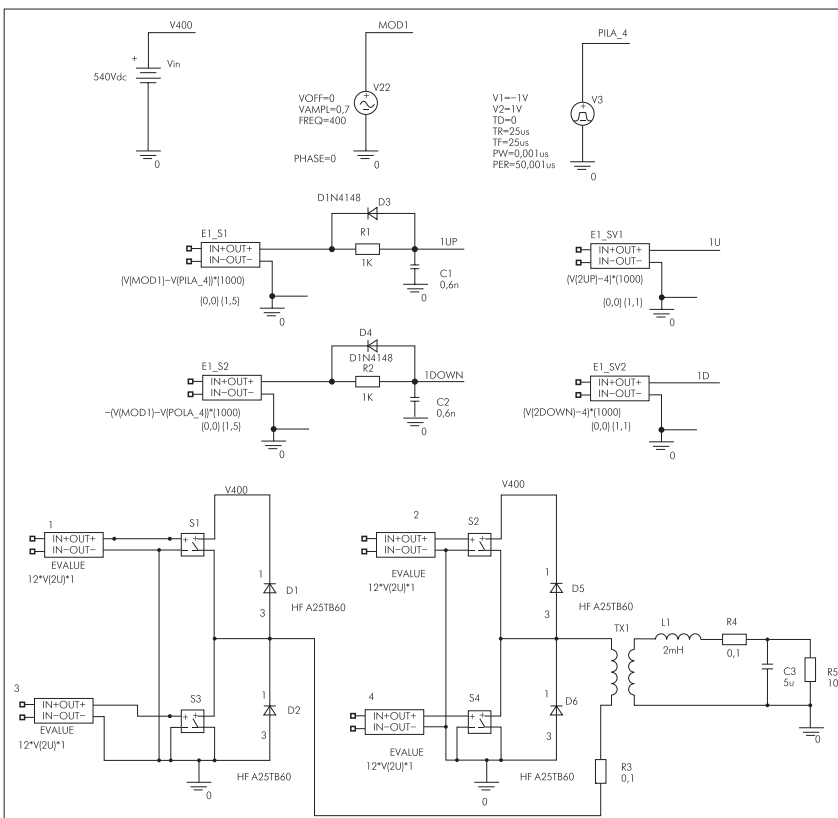


Рис. 13. Схема полномостового инвертора с выходным трансформатором

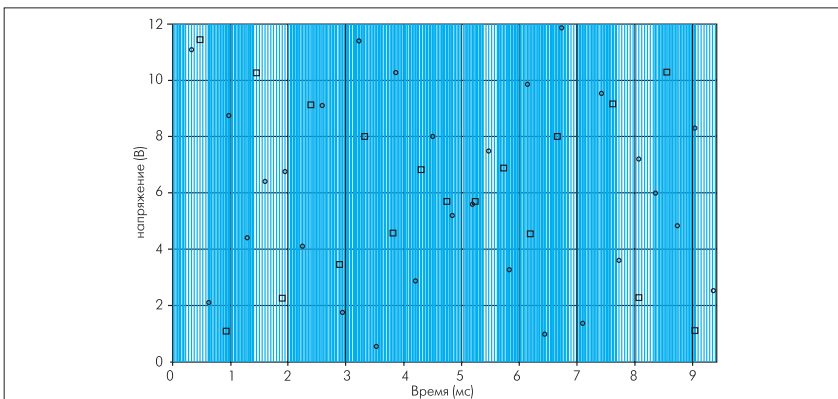


Рис. 15. Управляющий ШИМ-сигнал моделируемой схемы

ситуаций, вызванных различными факторами, например, технологическими разбросами свойств материалов.

В качестве примера рассмотрим часто встречающуюся схему мостового инвертора с выходным трансформатором, приведенную на рис. 13.

Смоделированная под оболочкой Capture в среде OrCAD 9.2 система управления формирует выходное напряжение, представленное на рис. 14, посредством ШИМ-сигнала, изображенного на рис. 15.

Эти рисунки иллюстрируют работу схемы в однозначно заданных условиях. В реальных условиях существует множество дестабилизирующих факторов, поэтому алгоритм работы инвертора направлен на компенсацию их влияния. Однако следует помнить: в рамках выполнения основного алгоритма работы существует вероятность достижения насыщения трансформатора (рис. 16), что может привести к аварийным последствиям.

Дополнив основной алгоритм работы несложным защитным алгоритмом (рис. 17) и используя незначительные свободные ресурсы системы управления, мы сможем избежать нежелательных последствий.

Логика работы представленного алгоритма основана на принципе самосохранения и предусматривает прекращение выполнения основного функционального раздела алгоритма (в данном случае, возможно,

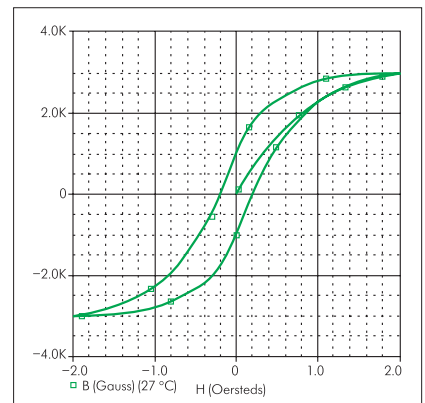
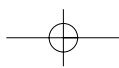


Рис. 16. Кривая намагниченности магнитного сердечника трансформатора



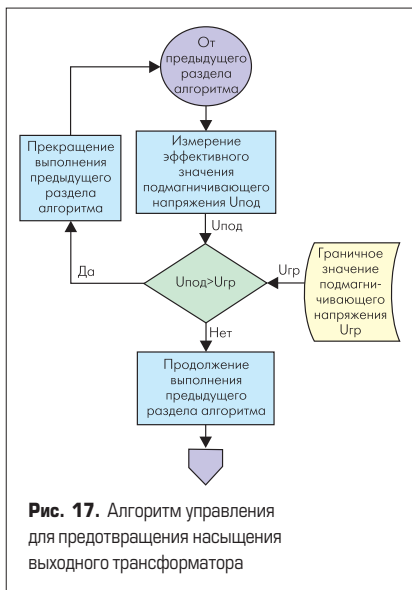
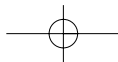


Рис. 17. Алгоритм управления для предотвращения насыщения выходного трансформатора

коррекции формы выходного напряжения), чтобы предотвратить выход из строя всей системы. Но дополнительный алгоритм не отключает систему, а несколько снижает качество выходного сигнала для сохранения ее работоспособности. Другими словами, здесь используется один из принципов, присущих интеллекту, — принцип самосохранения.

Реально это означает, что при наступлении критического случая система управления прекращает корректировать форму выходного напряжения и удерживает работу статического преобразователя напряжения в граничном состоянии, несмотря на искажения формы выходного напряжения. Рассматриваемый случай предотвращает аварийный выход из строя выходных ключей и сохраняется до изменения условий функционирования системы.

Выбор элементной базы, конструктивные особенности унифицированной ячейки и краткий анализ

Наиболее критичными элементами нашей схемы являются силовые ключи. Это вызвано выбранной нами частотой преобразования 40 кГц.

Исходя из этого, выбираем IGBT-транзисторы Power MOS 7 компании Advanced Power Technology [1].

Как показывает наш опыт работы в области микроэлектроники, представленные технологические особенности эффективно действуют в указанных направлениях, что подтверждает отнюдь не декларативный характер заявленных электрических параметров.

Приведенная информация указывает на полное соответствие параметров IGBT-транзисторов с требованиями, предъявляемыми к ним в разработанной схеме.

Выбранные алгоритмы и параметры системы управления, а также функциональные задачи, поставленные перед системой, заставляют нас использовать в системе управления

контроллер с цифровым сигнальным процессором. С точки зрения поставленных задач, а именно — управление формой выходного напряжения за каждый квант ШИМ, измерение тока каждого ключа с целью динамического выравнивания токов параллельно включенных субблоков и работа IGBT-транзисторов на частоте 40 кГц, DSP обладают подавляющим преимуществом.

Наиболее часто в системах управления вторичными источниками питания используются цифровые сигнальные процессоры серии TMS320 фирмы Texas Instrument. DSP серии TMS320 отличается высокой производительностью и большим количеством периферийных устройств, крайне необходимых при построении систем управления статическими преобразователями напряжения.

Однако в последнее время появились микропроцессоры с аналогичными характеристиками, но более дешевые в эксплуатации.

Размеры ячейки обусловлены предъявляемыми ограничениями по габаритам в плане (600×600 мм) и по высоте (600 мм).

То есть, если ячейка впишется в размер 19"×19" = (482,6×482,6 мм), мы выполним первое требование и требования международной унификации. Исходя из второго требования и габаритных размеров силовых элементов, высота ячейки не должна превышать 150 мм.

Выбранные схмотехнические решения и элементная база позволяют нам вписаться в указанные габариты.

Конструктивно ячейка строится классическим образом: на передней панели расположены плата дискретного ввода/вывода, микроконтроллер и элементы сигнальной коммутации; сзади — радиатор с мощными тепловыделяющими элементами и элементы мощной коммутации; между ними плата с остальными элементами схемы. Такая компоновка, как показывает практика, помогает решить тепловые проблемы. Кроме этого, моделирование электромагнитных процессов на этапе конструкторской разработки позволит решить многие вопросы электромагнитной совместимости. После моделирования фирма SEMIKRON снизила уровень паразитных электромагнитных излучений в своих интеллектуальных модулях в 2 раза [6].

А теперь рассмотрим удельную мощность — один из показателей современных преобразователей силовой электроники, наглядно характеризующий качество изделия. Предельно допустимая мощность нашего преобразователя — 4000 Вт. Объем блока равен $4,826 \times 4,826 \times 1,5 = 34,94$ дм³. Удельная мощность нашего двухкаскадного многофункционального преобразователя равна $4000/34,94 = 114,5$ (Вт/дм³), что весьма неплохо по современным меркам даже для однокаскадного преобразователя. Кроме того, существует возможность в 2 раза нарастить мощность, сохранив те же размеры.

Рассмотрев полученные результаты, можно утверждать, что разработанный эскизный проект является основой семейства статичес-

ких преобразователей нового поколения. Данное решение не только отвечает поставленным задачам, но и позволяет значительно расширить зону его использования.

Обобщение полученных результатов и используемых методов

Представленный вариант является одним из множества возможных. Но хотелось бы выделить некоторые закономерности, выявленные в процессе работы, и сделать обобщения:

1. Все большее распространение в системах управления как общей, так и силовой электроники находят цифровые, в частности микропроцессорные устройства.
2. Это позволяет создавать ряд функционально разнообразных устройств, используя однообразную оптимальную схмотехнику.
3. Разнообразие выполняемых функций и параметров все в большей степени определяется используемыми алгоритмами и программными средствами.
4. Алгоритмизация управления позволяет не только добиться новых функциональных возможностей, но и сделать процесс управления наглядным, логичным, простым и надежным.
5. Предлагаемая методика находится в русле развития электроники в целом.

В заключение хотелось бы отметить, что рассмотренная методика может быть распространена не только на другие виды источников питания, но и на другие виды силовой электроники, в частности, на управление приводами.

Литература

1. Щукина И., Некрасов М. Новая технология РТ IGBT против мощных полевых МОП-транзисторов // Силовая Электроника. 2004. № 1.
2. Однокаскадный корректор коэффициента мощности // Схмотехника. 2001. № 10.
3. Темиров А. П., Федоров А. Е., Маслюк С. И., Юрин А. В. Алгоритм формирования синусоидального напряжения для систем бесперебойного питания // Электропитание. 2003. Вып. 5.
4. Силкин В. А. Вариант построения статических преобразователей напряжения // Компоненты и технологии. 2004. № 8.
5. Силкин В. А. Пример создания комплекса алгоритмов управления высококачественными статическими преобразователями напряжения // Компоненты и технологии. 2004. № 9.
6. Силкин В. А. Оптимизация электромагнитной совместимости на основе 3D-отображения и классической теории цепей с распределенными параметрами // Компоненты и технологии. 2005. № 2.
7. Силкин В. А. «Интеллектуализация» электронных устройств // Компоненты и технологии. 2005. № 3.
8. Силкин В. А. Эскизный проект системы статических преобразователей напряжения // Современная электроника. 2005. № 3.

