

# Эскизный проект системы статических преобразователей напряжения

Владимир Силкин (г. Калуга)

В предлагаемой статье представлен вариант эскизного проекта многофункциональной системы статических преобразователей напряжения. Данная разработка основывается на последних достижениях в области системотехники и схмотехники силовой электроники, подтверждённых моделированием в среде OrCAD 9.2. В проекте используется элементная база силовой электроники, выполненная по самой совершенной в настоящее время технологии Power MOS 7.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ СИСТЕМЕ

### Электрические требования

Общей поставленной задачей является создание статических преобразователей однофазного напряжения (СПО) и трёхфазного напряжения (СПТ). Частной рассматриваемой задачей является выбор вариантов построения системы и алгоритма управления, а также выбор микроконтроллера. Требуемые электрические параметры преобразователей приведены в таблице.

### Функциональные требования

Разрабатываемая система должна обладать всеми функциями защиты и мониторинга, характерными для современных систем силовой электроники:

- контроль входного, промежуточного и выходного напряжения преобразователя;
- контроль входного и выходного тока;
- защита от токовой перегрузки;
- защита от короткого замыкания;
- защита от перегрева.

Кроме того, для осуществления параллельной работы силовых элемен-

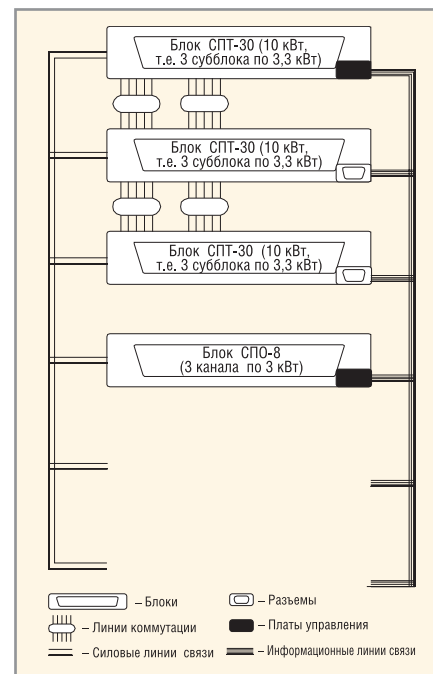


Рис. 1. Эскиз функциональной схемы однофазного и трёхфазного статических преобразователей напряжения (СПО и СПТ)

тов и трёхфазного построения на систему дополнительно накладываются функции динамического выравнивания токов выходных силовых ключей и синхронизации работы силовых элементов.

### Конструктивные требования

Габариты в плане не должны превышать 600 × 600 мм, высота должна быть не более 600 мм.

## СИСТЕМНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВАРИАНТА ПОСТРОЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Рассмотрим часть системы – однофазные и трёхфазные преобразователи напряжения, построенные на основе схем инверторов напряжения и питаемые выпрямленным напряжением сети. В качестве базового предлагается вариант построения системы статических преобразователей, приведённый на рисунке 1.

### Технические требования к электрическим параметрам

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

Предлагаемый вариант логически происходит из осмысления поставленной в технических требованиях задачи. Рассмотрим это подробнее. Необходимо разработать трёхфазный статический преобразователь мощностью 30 кВт и однофазный мощностью 8 кВт. Поставленная задача неявно подразумевает возможность (или даже необходимость) параллельного включения какого-то минимального элемента. Если найти наименьшее общее кратное, то оно будет равно 3,3 кВт. Таким образом, предлагаемый вариант будет соответствовать рисунку 1: три трёхфазных блока по 10 кВт (в каждом по три субблока мощностью 3,3 кВт) и один однофазный блок мощностью 8 кВт (состоит из трёх субблоков по 3,3 кВт).

Приведённая система позволяет:

- использовать глубокую внутреннюю унификацию;
- применить параллельное включение блоков СПТ и каналов СПО;
- применить апробированный вариант построения статического преобразователя (с корреляцией по мощности);
- легко наращивать и снижать мощность статических преобразователей.

Рассмотрим вышесказанное по пунктам. 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 силовой части) и в комплектации.

Параллельное включение блоков СПТ и каналов СПО возможно при использовании в качестве силовых ключей IGBT – транзисторов с положительным коэффициентом напряжения насыщения – и при соединении параллельных элементов непосредственно на выходе мостов и после силовых фильтров. Динамическое выравнивание токов и балансировка фаз возложены на систему управления.

Информация об аналогичном по мощности варианте построения канала статического преобразователя изложена в статье [1].

Сама предлагаемая структура построения статических преобразователей напряжения подразумевает возможность простого варьирования мощности статических преоб-

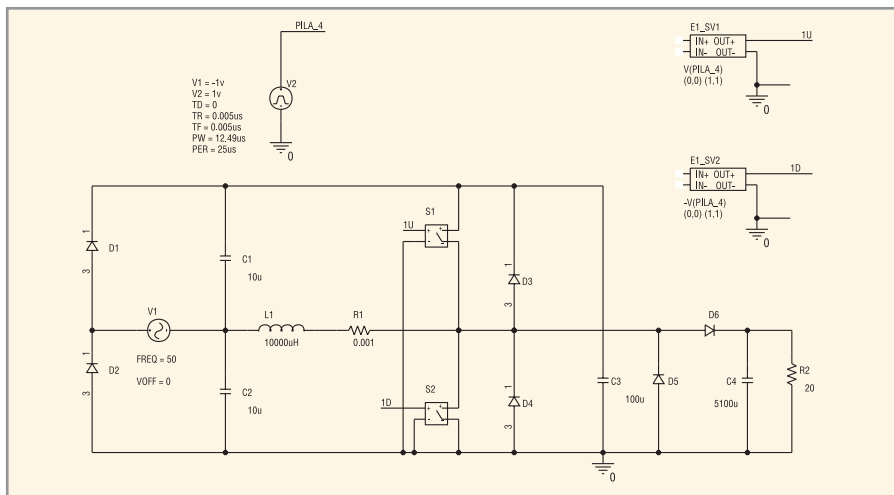


Рис. 2. Схема плавающего полумостового повышающего преобразователя, подготовленная для моделирования в среде OrCAD 9.2

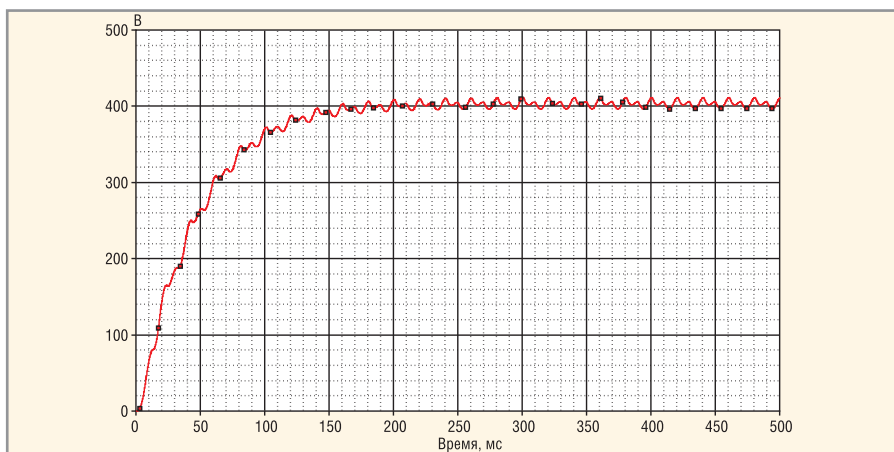


Рис. 3. Эюра выходного напряжения ППП преобразователя

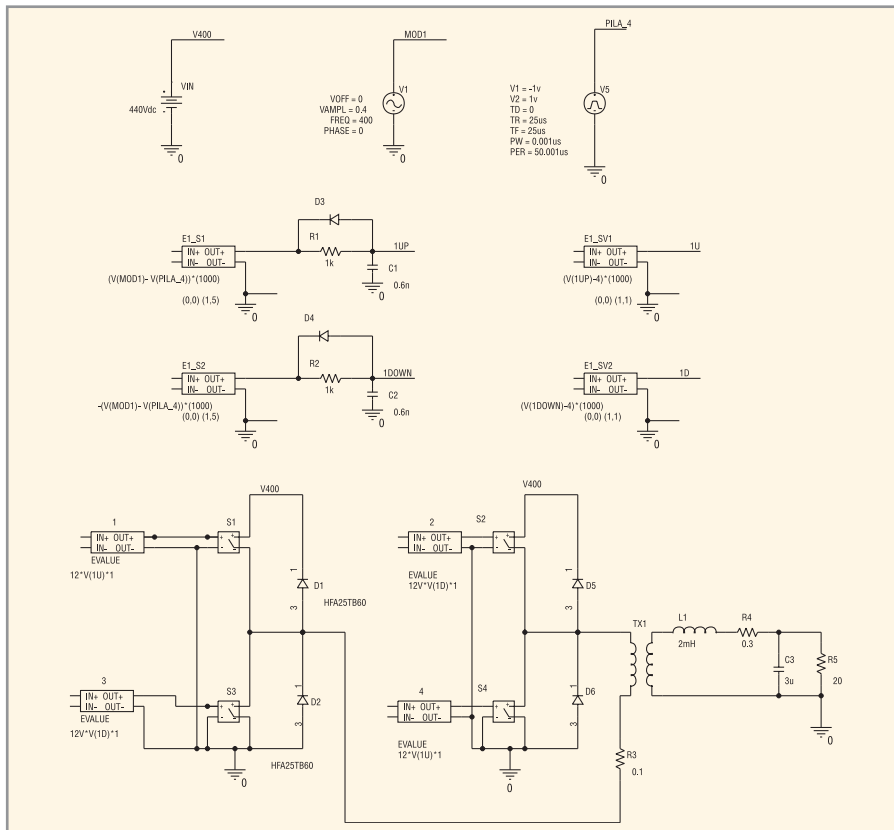


Рис. 4. Схема полномостового инвертора, подготовленная для моделирования в среде OrCAD 9.2

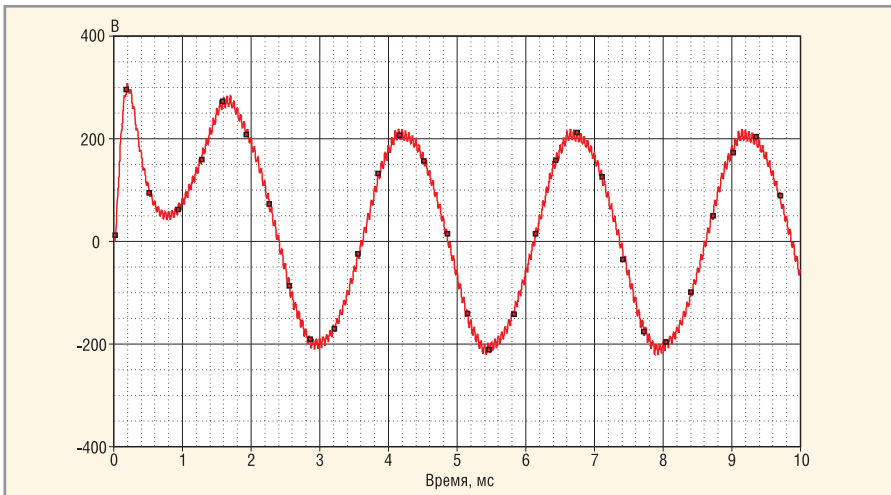


Рис. 5. Эюра выходного напряжения полномостового инвертора

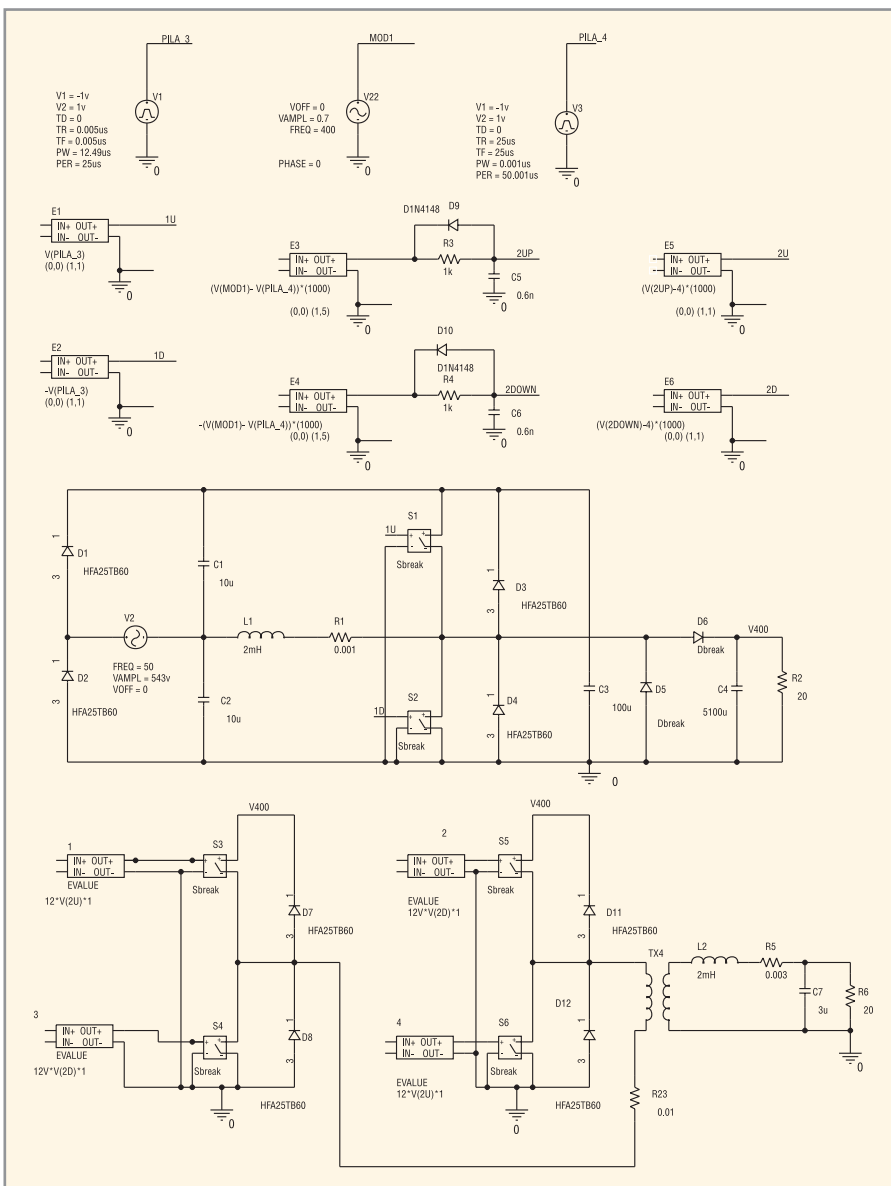


Рис. 6. Схема предложенного варианта статического преобразователя напряжения, подготовленная для моделирования под оболочкой Capture OrCAD

разователей благодаря параллельному включению блоков и каналов. Рассматриваемый вариант представляет собой систему построения

статических преобразователей напряжения на основе унифицированной базовой ячейки (УБЯ). УБЯ – это законченный блок, выполняю-

щий 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).

**СТРУКТУРА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ ЯЧЕЙКИ, КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ПОЯСНЕНИЯ НА ОСНОВНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Схема построения унифицированной базовой ячейки логически проистекает из заявленных функций – выпрямление входного напряжения переменного тока, коррекция коэффициента мощности, стабилизация постоянного напряжения возлагается на «плавающий» полумостовой повышающий (ППП) преобразователь (теоретически обоснован в статье [2]). Схема, подготовленная для моделирования в среде OrCAD 9.2, приведена на рисунке 2.

Отметим наличие в схеме конденсатора C4, который является не только фильтрующим, но и энергозапасующим (для обеспечения возможности переключения входного напряжения). Эюра выходного напряжения приведена на рисунке 3.

Преобразование постоянного напряжения в переменное и стабилизация выходного напряжения переменного тока (с функцией корректора формы выходного напряжения) реализуется хорошо известной схемой полномостового инвертора. Схема, подготовленная для моделирования в среде OrCAD 9.2, приведена на рисунке 4; эюра выходного напряжения – на рисунке 5.

Описанная архитектура позволяет с необходимым качеством решить поставленные задачи и избежать многих неприятностей. Общая схема моделирования приведена на рисунке 6.

Результаты моделирования демонстрируют полное соответствие поставленным задачам. Эюра выходного напряжения показана на рисунке 7, а его спектральный состав – на

рисунке 8. Все представленные материалы доказывают правильность сделанного выбора.

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

### ОСНОВНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Алгоритм управления первым звеном, основанный на позиционном пропорциональном регулировании, приведён на рисунке 9. Представленный алгоритм позволяет не только эффективно стабилизировать промежуточное постоянное напряжение, но и в случае необходимости изменять величину стабилизируемого напряжения. Эта необходимость может возникнуть при работе комплекса алгоритмов в режиме коррекции формы выходного сигнала, когда величины промежуточного постоянного напряжения может быть недостаточно.

Алгоритм управления вторым звеном на базе самонастраивающейся системы на основе синусоидальной ШИМ приведён на рисунке 10.

### Коррекция формы выходного напряжения

Рассмотрим работу представленной схемы на емкостной выпрямителе, представленный на рисунке 11. Такой вариант работы статических преобразователей напряжения встречается достаточно часто. Но самое главное, что такой вариант работы характеризуется максимальными искажениями формы выходного сигнала. Таким образом, это наиболее наглядное представление возможностей алгоритма в плане коррекции формы выходного напряжения. Эпо́ра нескорректированного выходного напряжения при работе на емкостной выпрямителе показана на рисунке 12.

На рисунке наглядно видно, что, несмотря на правильную форму ШИМ-сигнала, форма выходного низкочастотного сигнала искажена. Это позволяет построить концепцию коррекции формы вы-

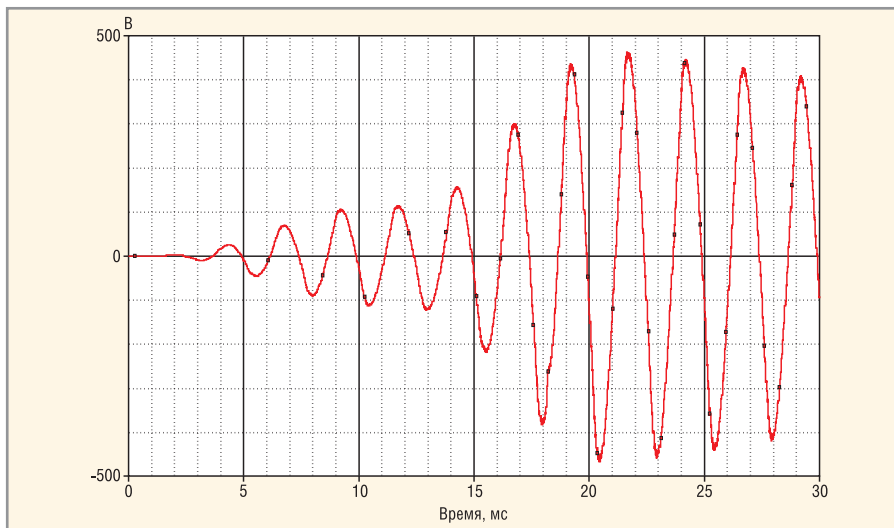


Рис. 7. Эпо́ра выходного напряжения схемы, приведённой на рис. 6

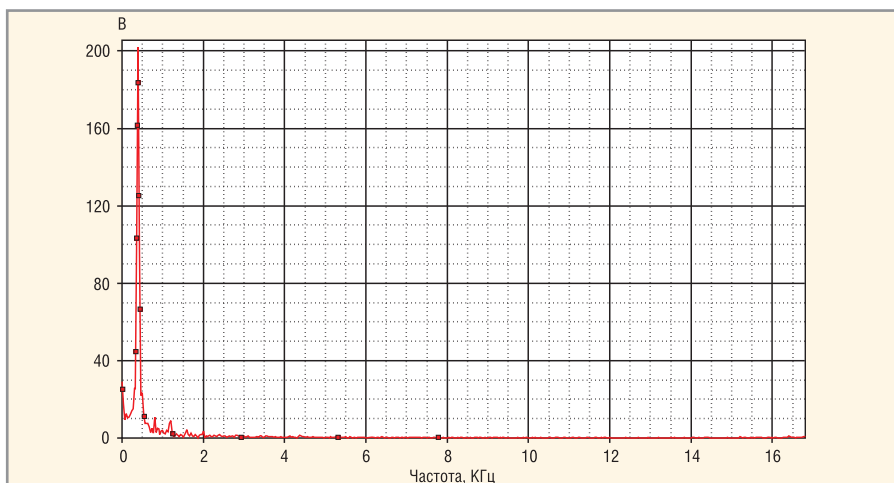


Рис. 8. Спектральный состав выходного сигнала

ходного напряжения на основе изменения ШИМ-сигнала пропорционально отклонению реального сигнала от идеального. В алгоритме управления вторым звеном используется метод стабилизации выходного напряжения (с функцией корректора формы выходного напряжения), когда измеряется выходное напряжение в каждой точке дискретизации периода (идея опубликована в статье [3]).

Зная выходное напряжение в каждой точке, можно вычислить значенные длительности ШИМ-сигнала для следующей точки:

$$\text{Sin}_n = U_{\text{ref}}/U_{\text{izm}} \times \text{Sin}_{n-1},$$

где  $1 < n < N$ ,  $U_{\text{ref}}$  – стабилизируемое амплитудное напряжение в единицах АЦП,  $U_{\text{izm}}$  – измеренное напряжение в единицах АЦП,  $\text{Sin}_{n-1}$  – расчётное значение длительности ШИМ-сигнала для предыдущего кванта времени.

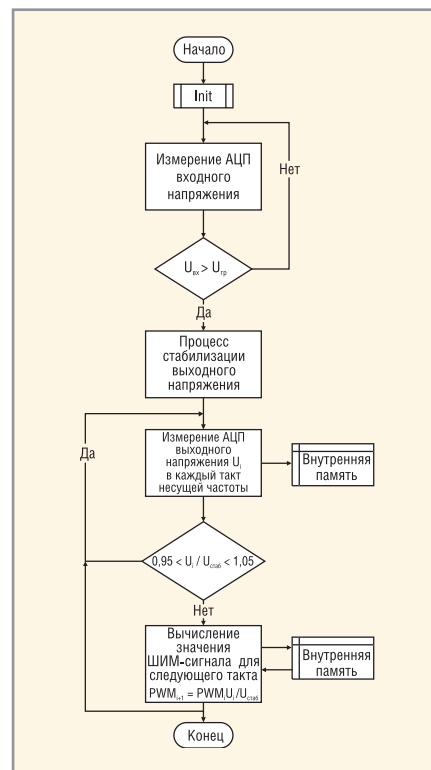


Рис. 9. Алгоритм управления на основе позиционного пропорционального регулятора

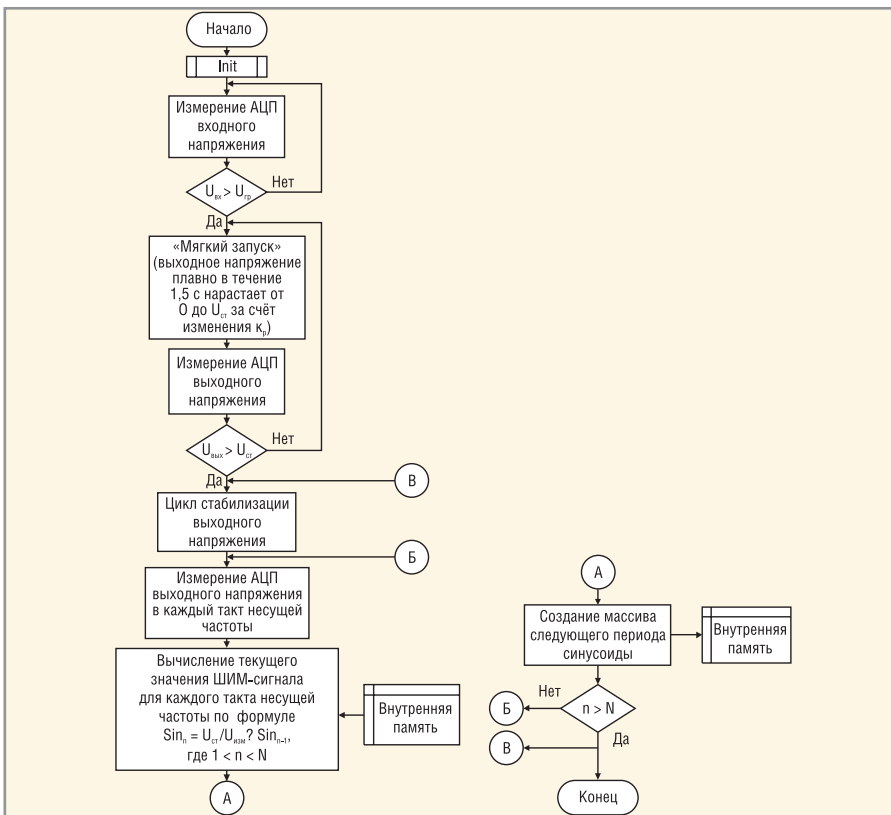


Рис. 10. Алгоритм управления самонастраивающейся системы на основе синусоидальной ШИМ

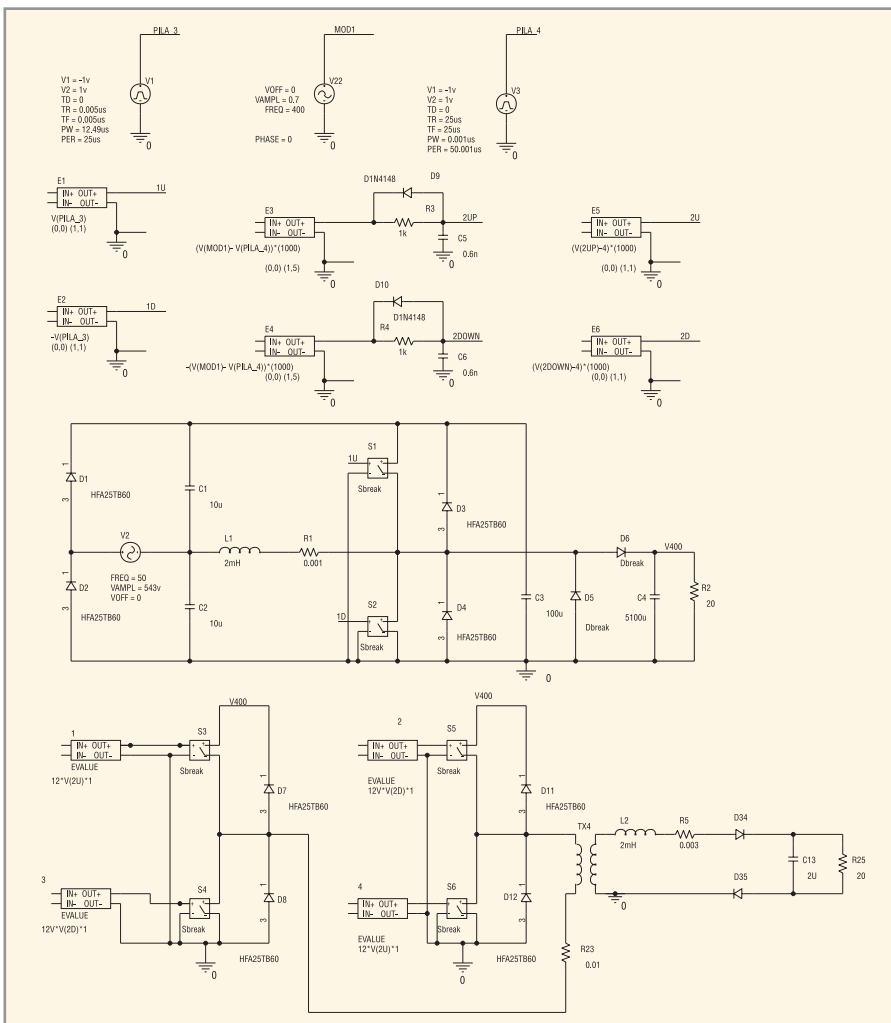


Рис. 11. Схема моделирования работы статического преобразователя напряжения на ёмкостную нагрузку

**Параллельное включение**

Параллельное включение чревато опасностью разбалансировки параллельно включённых плеч, особенно если происходит аварийный рост тока в отдельном плече. На систему управления накладывается задача динамического выравнивания выходного тока параллельно включённых плеч с целью предотвращения аварий. Существуют два возможных пути динамического изменения выходного тока: первый – путём изменения величины промежуточного постоянного напряжения; второй – путём изменения коэффициента регулирования  $k_p$ .

Процесс изменения величины промежуточного постоянного напряжения наглядно изображён на рисунке 13.

Динамическое изменение выходного тока путём изменения коэффициента регулирования  $k_p$  изображено на рисунке 14.

Представленные результаты доказывают жизнеспособность предложенных методов.

**Предотвращение насыщения выходного трансформатора**

Предложенный 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 ситуаций за счёт различных факторов, например за счёт технологических разбросов свойств материалов.

Работа алгоритма коррекции формы выходного напряжения в большинстве случаев приводит к повышению намагниченности, поэтому при расчёте сердечника необходимо учитывать эту дополнительную намагниченность. Для предотвращения аварийного насыщения в алгоритм вводится дополнительная цепь предохранения, которая независимо от необходимости повышения намагниченности (допустим, при коррекции выходного напряжения) ограничивает её рост. Реально это означает, что при наступлении кри-



тического случая система управления прекращает корректировать форму выходного напряжения и удерживает работу статического преобразователя напряжения в граничном состоянии, несмотря на искажения формы выходного напряжения. Такая защита предотвращает аварийный выход из строя выходных ключей и действует до изменения условий функционирования системы.

### ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ И ВАРИАНТА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Наиболее критичными элементами схемы являются силовые ключи. Мы остановили выбор на IGBT-транзисторах Power MOS 7 компании Advanced Power Technology (обоснование – в статье [4]).

Исходя из задач, алгоритмов и параметров системы для управления был выбран контроллер с цифровым сигнальным процессором (DSP). Для управления формой выходного напряжения за каждый квант ШИМ, измерения тока каждого ключа для динамического выравнивания токов параллельно включенных субблоков и работы IGBT-транзисторов на частоте 40 кГц, DSP является чуть ли не единственным средством реализации.

В системах управления вторичными источниками питания часто используются DSP серии TMS320 фирмы Texas Instrument. Они отличаются высокой производительностью и большим количеством периферийных устройств, необходимых при построении систем управления статическими преобразователями напряжения.

### ГАБАРИТЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЯЧЕЙКИ СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПЯЖЕНИЯ

Как уже было сказано выше, ячейка должна вписываться в размер 19 × 19 дюймов (482,6 × 482,6 мм) в соответствии с требованиями международной унификации. Высота ячейки не должна превышать 150 мм.

Выбранные схмотехнические решения и элементная база позво-

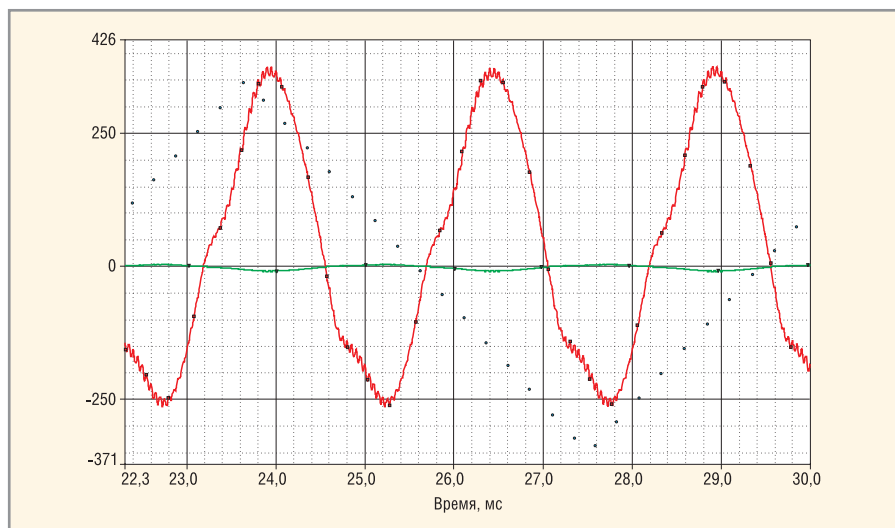


Рис. 12. Эпюры выходного напряжения, напряжения ШИМ-сигнала и выходного тока схемы при работе на емкостной выпрямитель

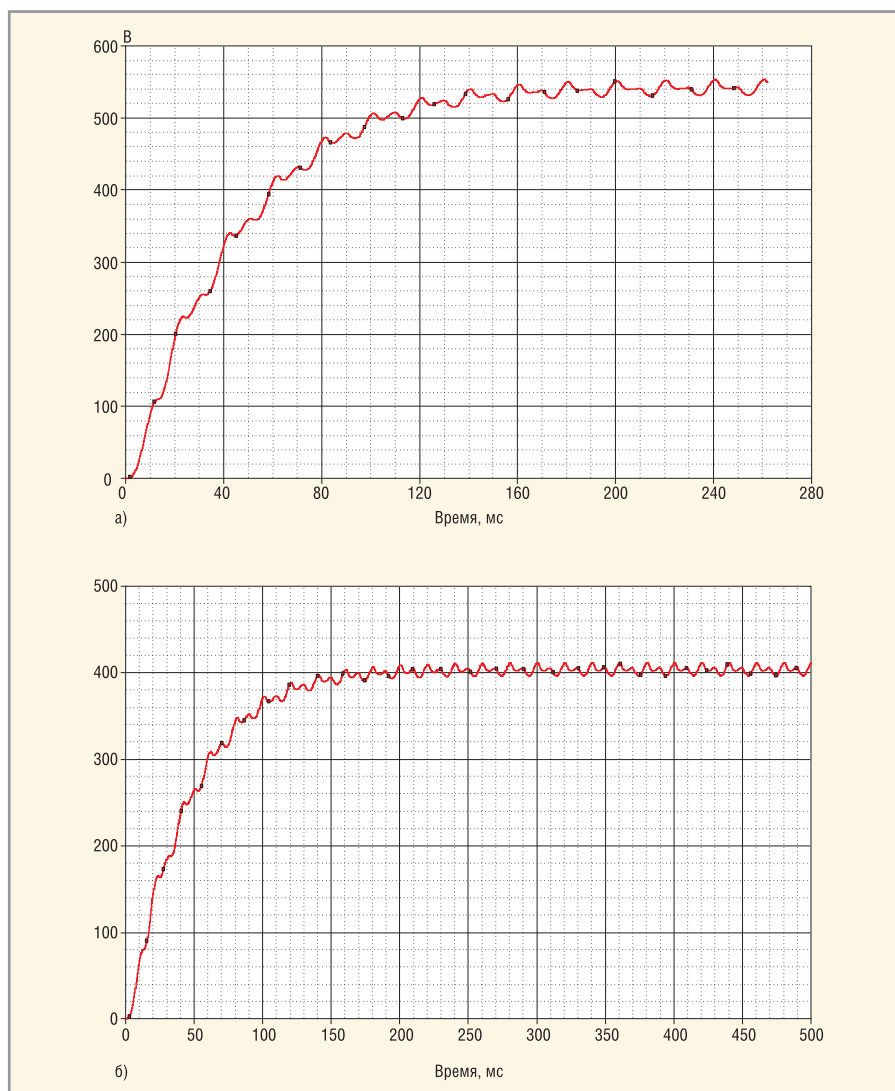
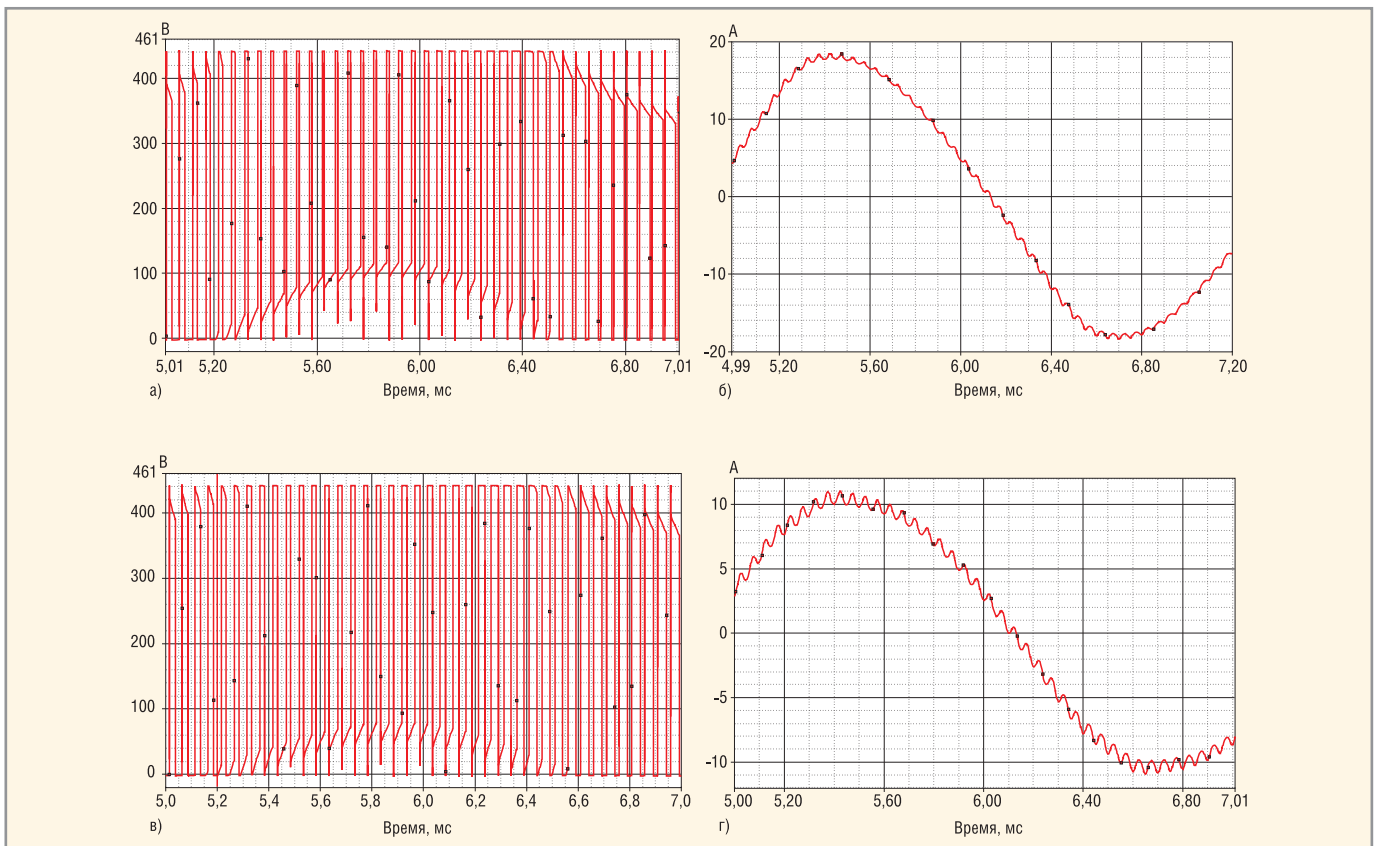


Рис. 13. Эпюры промежуточного постоянного напряжения: а) при  $U_{нп} = 545$  В; б) при  $U_{нп} = 400$  В

ляют вписаться в указанные габариты.

Конструктивно ячейка строится классическим образом: на передней панели – плата дискретного ввода/вывода, микроконтроллер и эле-

менты сигнальной коммутации; сзади – радиатор с мощными тепловыделяющими элементами и элементы мощной коммутации; между ними – плата с остальными элементами схемы. Такая компоновка, как пока-



**Рис. 14. Динамическое изменение выходного тока путем изменения коэффициента регулирования  $k_p$**   
 а) ШИМ-сигнал при  $k_p = 0,7$ ; б) выходной ток при  $k_p = 0,7$ ; в) ШИМ-сигнал при  $k_p = 0,4$ ; г) выходной ток при  $k_p = 0,4$

зывает практика, помогает решить проблемы с отводом тепла. Кроме того, моделирование электромагнитных процессов на этапе конструкторской разработки позволит решить многие вопросы электромагнитной совместимости. Так, после моделирования фирме Semikron удалось снизить уровень паразитных электромагнитных излучений в своих интеллектуальных модулях в 2 раза.

Моделирование может включать в себя трёхмерное представление разрабатываемого блока в среде AutoCAD и его анализ математическим аппаратом линий с распределёнными параметрами.

Рассмотрим также один из показателей современных преобразователей силовой электроники, наглядно характеризующий качество изделия, – удельную мощность. Предельно допустимая мощность нашего преобразователя – 4 кВт. Объём блока равен  $4,826 \times 4,826 \times 1,5 = 34,94 \text{ дм}^3$ . Удельная мощность нашего двухкаскадного многофункционального преобразователя:  $4000/34,94 = 114,5 \text{ (Вт/дм}^3\text{)}$ , что весьма неплохо по современным меркам даже для однокаскадного преобразователя. Кроме

того, в этих габаритах существует возможность повысить мощность вдвое.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение хотелось бы отметить, что предложенный вариант построения статических преобразователей напряжения использует самые последние достижения в различных областях и может быть положен в основу построения целого ряда преобразователей.

Необходимо также отметить гибкость используемого решения, так как для изменения, допустим, значения выходного параметра (в небольших пределах) достаточно изменить программу, практически не затрагивая самого изделия. Кроме того, возможно использование УБЯ без первого каскада, то есть в качестве преобразователя DC/AC. Необходимо отметить и функциональную оснащённость систем управления, позволяющую решить целый ряд весьма важных задач.

Таким образом, представленный эскизный проект может лечь в основу разработки семейства статических преобразователей напряжения на основе одной унифициро-

ванной, тщательно просчитанной ячейки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Темирёв А.П., Апииков В.Р., Лозицкий О.Е., Никифоров Б.В., Луговец В.А., Москаленко Г.М., Харитонов С.А., Ляпидов К.С., Скачков Ю.В., Цветков А.А. Статический преобразователь для питания потребителей синусоидальным напряжением 50 Гц, 3,75 кВт. Электропитание. 2003. Вып. 5.
2. Однокаскадный корректор коэффициента мощности. Схемотехника. 2001. № 10.
3. Темирёв А.П., Федоров А.Е., Маслюк С.И., Юрин А.В. Алгоритм формирования синусоидального напряжения для систем бесперебойного питания. Электропитание. 2003. Вып. 5.
4. Щукина И., Некрасов М. Новая технология РТ IGBT против мощных полевых МОП-транзисторов. Силовая электроника. 2004. № 1.
5. Силкин В.А. Пример создания комплекса алгоритмов управления высококачественными статическими преобразователями напряжения. Компоненты и технологии. 2004. № 9.
6. Силкин В.А. Вариант построения статических преобразователей напряжения. Компоненты и технологии. 2004. № 8.

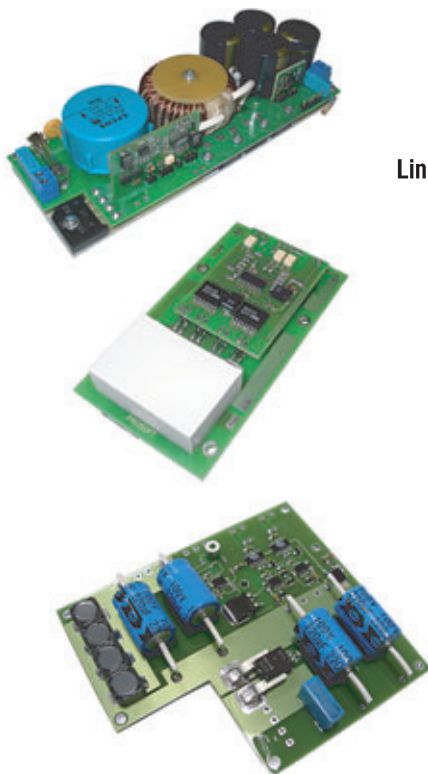


# НАДЕЖНОСТЬ ЭКОНОМИЧНОСТЬ ПЕРЕДОВАЯ СХЕМОТЕХНИКА



## Новая линейка

высокоэффективных источников электропитания с резонансным преобразованием, синхронным выпрямлением и функцией UPS – идеальное решение для высоконадёжных систем телекоммуникации и промышленной автоматики



## СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

ККМ на базе контроллера промышленного стандарта Linear Technology и высоковольтного SiC-диода Шоттки CREE

Резонансный преобразователь напряжения с переключением в режиме нулевого напряжения

Синхронное выпрямление выходного напряжения

## ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА

- Высокая удельная мощность
- Естественное охлаждение без применения вентилятора
- Высокая эффективность
- Низкий уровень электромагнитных помех
- Стандартное исполнение 6U-12HP
- Опция заряда аккумуляторной батареи
- Промышленный температурный диапазон

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

НАИМЕНОВАНИЕ	МИНИМУМ	НОМИНАЛ	МАКСИМУМ
Выходное напряжение, В	10	13,6	14
	18	28	36
	36	48	48
	48	60	72
Входное напряжение, ~50/60 Гц, В	180	220	250
Максимальная мощность нагрузки, Вт	1200		
Коэффициент мощности	0,99		
КПД не менее, %	90		
Относительный уровень пульсаций, %	0,1		
Габариты, мм	235 x 225 x 60		
Масса, кг	2,8		

## ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА

### Активные компоненты

CREE  
Linear Technology  
International Rectifier  
IXYS  
MAXIM  
Texas Instruments  
ST Microelectronics  
Philips

### Пассивные компоненты

EPCOS  
Micrometals  
Murata  
Sumida