

# Применение микропроцессоров

## в системах управления транзисторных выпрямителей

**В статье рассмотрены требования, предъявляемые к системам управления современных транзисторных выпрямителей. Проведено сравнение существующей аналоговой, а также смешанной и полностью цифровой системой управления. Показаны возможности выпускаемых микроконтроллеров, применимых в преобразовательной технике. Кроме того, приведены данные испытаний выпрямителей, использующих микроконтроллеры серии AVR фирмы Atmel в системе управления.**

**Валерий Мелешин**

meleshin@sving.ru

**Денис Овчинников**

denis@sving.ru

Одним из актуальных направлений развития современных устройств вторичного электропитания является построение транзисторных импульсных преобразователей напряжения сети в постоянное (выпрямителей). Такие устройства при современных требованиях к коэффициенту мощности и содержанию гармоник тока потребляемого от сети, как правило, выполняются с двумя ступенями преобразования энергии и содержат в силовой части корректор коэффициента мощности (ККМ) и преобразователь постоянного напряжения (DC/DC).

Система управления выпрямителем является его составной частью, выполняя большое количество функций, сложность и число которых непрерывно возрастают. Сравнительно новым для отечественных разработок является требование обеспечения работы блока от так называемой широкой (универсальной) сети с диапазоном напряжения одной фазы 85–265 В, причем в ряде случаев требование к верхнему пределу может возрасти вплоть до 300 В. Другим возможным требованием может быть снижение максимальной мощности выпрямителя при повышении температуры окружающей среды по сравнению с указанной в технических условиях. Система управления содержит большое число различных блоков и занимает значительное место в конструкции выпрямителя.

Из сказанного следует, что к разработке и проектированию управляющей части выпрямителя необходимо подходить с не меньшей тщательностью, чем к задачам построения силовой части.

Цель данной статьи — показать и сравнить между собой возможные принципы построения систем управления выпрямителями от традиционных до перспективных.

Перечислим основные функции, выполняемые системой управления:

- Стабилизация выходного напряжения, тока или мощности.
- Формирование вида требуемой выходной характеристики.
- Обеспечение требуемой зависимости максимальной выходной мощности от уровня напряжения в сети.

- Снижение пульсаций напряжения на выходе в заданных диапазонах частот, а также псофометрического шума до значений, устанавливаемых стандартами.
- Выравнивание выходных токов при параллельной работе устройств.
- Формирование процесса запуска во времени с определенной очередностью подключения ступеней силовой части.
- Обеспечение быстродействующих защит:
  - по входному току ККМ;
  - по току первичной стороны DC/DC-преобразователя.
- Обеспечение «медленных» защит:
  - по максимальному выходному напряжению ККМ и DC/DC-преобразователя;
  - по предельным значениям сетевого напряжения;
  - по максимальной температуре некоторых компонентов силовой части;
  - по току нагрузки.
- Включение и выключение, индикация некоторых параметров работы выпрямителя.
- Интерфейс с системой управления верхнего уровня (управление несколькими выпрямителями, установленными в шкафу или стойке).  
Перечисленные функции показывают, насколько развитой должна быть система управления современного выпрямителя.  
Традиционно управление выпрямителем выполнялось с применением только аналоговых компонентов. Однако при современных требованиях аналоговая система получается громоздкой, многоэлементной, не всегда помехозащищенной и занимающей много места на плате. Некоторые задачи, как, например, обеспечение интерфейса, решаются достаточно сложно. Развитие современных микроконтроллеров и процессоров, расширение их возможностей при постоянном снижении стоимости привело к необходимости построения систем, использующих частично или полностью цифровые методы управления.  
Цифровое управление может быть выполнено на основе двух принципов:
  - «медленные» задачи управления решаются цифровыми средствами, а быстрые, требующие реализации ШИМ и построения некоторых защит, —

аналоговыми (смешанная система управления — ССУ);

- управление всеми функциями выпрямителя с помощью цифрового сигнального процессора (полностью цифровая система управления — ПЦСУ).

В первом случае аналоговыми средствами (ШИМ-контроллерами, операционными усилителями, компараторами и другими) решаются задачи стабилизации напряжения, тока и мощности, выравнивание токов выпрямителей, работающих параллельно, выполнение защитных функций, которые требуют быстрой реакции на опасные для электронных приборов силовой части воздействия. Все остальные задачи, связанные с обработкой сигналов включения-выключения, работой «медленных» устройств защиты, вычислением и заданием опорных сигналов, формирования требуемого вида выходной характеристики — возлагаются на микроконтроллер [1].

В полностью цифровой системе управления микропроцессор участвует не только в создании сигналов, формируемых при медленных процессах, но обеспечивает также цифровую обработку сигналов для реализации широтно-импульсного управления и создания необходимых обратных связей в контурах управления [2]. Весьма полезной новой функцией, достижимой для обоих принципов управления, является возможность юстировки (подгонки) некоторых параметров выпрямителя: задаваемого выходного напряжения, отображения выходного тока и параметров слежения за сетью.

Техническими средствами реализации смешанной системы управления могут быть любые 8- или 16-разрядные микроконтроллеры, такие как серии AVR фирмы ATMEL, серии MSP фирмы TI и другие. Эти устройства имеют сокращенный набор команд (RISC-микроконтроллеры), флэш-память и широкий набор периферийных устройств, использующихся при создании преобразователей (многоканальные АЦП, таймеры, ШИМ-контроллеры, различные интерфейсы — UART, CAN, SPI и другие).

Микроконтроллеры серии ATMEGA (ATMEL) по своим параметрам хорошо подходят для построения ССУ. Они являются 8-разрядными, имеют тактовую частоту 16 МГц, содержат 10-разрядный мультиплексированный АЦП последовательного приближения, 8- и 16-разрядные таймеры. С другой стороны, микроконтроллеры TI отличает 16-разрядная структура с тактовой частотой до 8 МГц и с более развитыми возможностями АЦП, как, например, 12-разрядный многоканальный АЦП последовательного приближения или 16-разрядный сигма-дельта АЦП, отличающийся возможностью измерения аналоговых сигналов с большим разрешением при незначительном снижении быстродействия. Микроконтроллеры фирм ATMEL и TI обеспечивают аппаратное перемножение, что позволяет решать некоторые задачи целочисленной арифметики. Важным достоинством микроконтроллеров TI является их микромощное потребление, составляющее 250 мкА/MIPS. Реализация ПЦСУ требует применения более

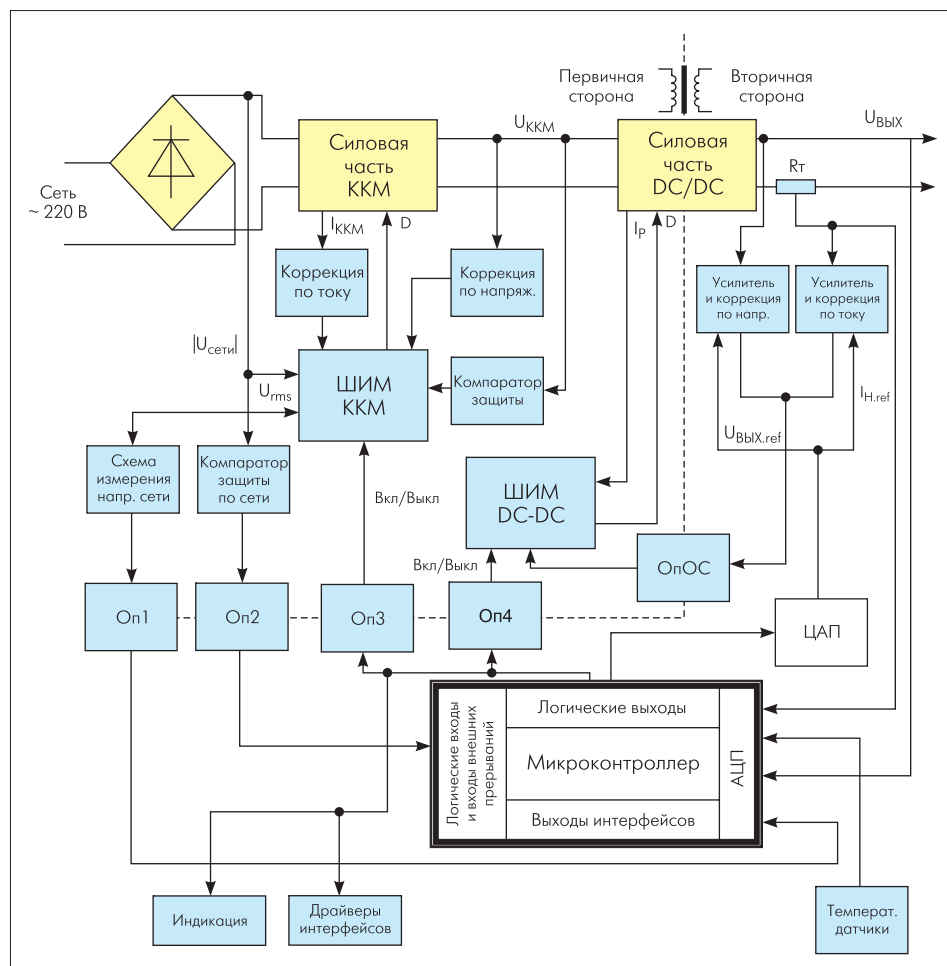


Рис. 1. Система управления с использованием микроконтроллера и аналоговых ШИМ-контроллеров

мощных средств цифровой обработки, таких как цифровые сигнальные процессоры (DSP), выпускаемых фирмами Texas Instruments (C2000) и FREESCALE.

Помимо этого, ПЦСУ может быть выполнена с использованием программируемой логики CPLD, FPGA фирм Xilinx, Altera, однако по стоимости такая реализация может оказаться дороже, а возможности управления — не столь широкими, как в случае применения DSP-процессоров.

Рассмотрим применение первого принципа (ССУ) в выпрямителе с двукратным преобразованием энергии. На рис. 1 показана структурная схема выпрямителя без элементов защиты от импульсных воздействий по сети и без фильтров защиты от радиопомех, устанавливаемых как на входе, так и на выходе.

Система управления выпрямителем, построенная таким образом, содержит несколько аналоговых узлов, микроконтроллер и ЦАП. Пунктирная линия, показанная на рисунке, разделяет первичную сторону выпрямителя (гальванически связанной с сетью) с вторичной (связанной с выходом). ШИМ-контроллер DC/DC, показанный на рис. 1, относится к первичной стороне, но в зависимости от схемы DC/DC-преобразователя может быть размещен на вторичной стороне выпрямителя. В таком случае отпадает надобность в оптроне обратной связи (оптрон OpOS на рис. 1), но появляется необходимость в передаче импульсных сигналов на затворы ключей преобразователя с помощью развязывающих импульсных трансформаторов.

Микропроцессор подключен к вторичной стороне преобразователя, поэтому необходимы оптронные развязки сигналов (оптроны Оп1...Оп4).

Оп1 передает сигнал об измеренном напряжении сети; с помощью Оп2 передается сигнал о перенапряжении в сети, полученный от компаратора; через Оп3 к Оп4 передаются сигналы от микропроцессора на включение или выключение KKM и DC/DC-преобразователя.

На АЦП со вторичной стороны выпрямителя поступают сигналы о выходном напряжении ( $U_{\text{вых}}$ ) и токе нагрузки. Последний формируется токовым датчиком (на рис. 1 низкоомный резистор  $R_t$ ). Опорные (reference) сигналы по выходному напряжению и току поступают от ЦАП и могут изменяться в зависимости от требований к выпрямителю и режима его работы. Сигналы от температурных датчиков (непрерывных и дискретных), устанавливаемых обычно на теплоотводах, также поступают в АЦП микропроцессора. Одной из функций выпрямителя является плавный запуск, который может быть заметно растянут во времени, для того чтобы избежать больших токов через силовые ключи и диоды вследствие большой емкости выходного фильтра и возможности подключения большой нагрузки.

Поэтому в процессе запуска плавно нарастает опорный сигнал по току, удерживающий усилитель рассогласования по выходному току в рабочем режиме, а аналоговый усилитель по напряжению — в заблокированном состоя-

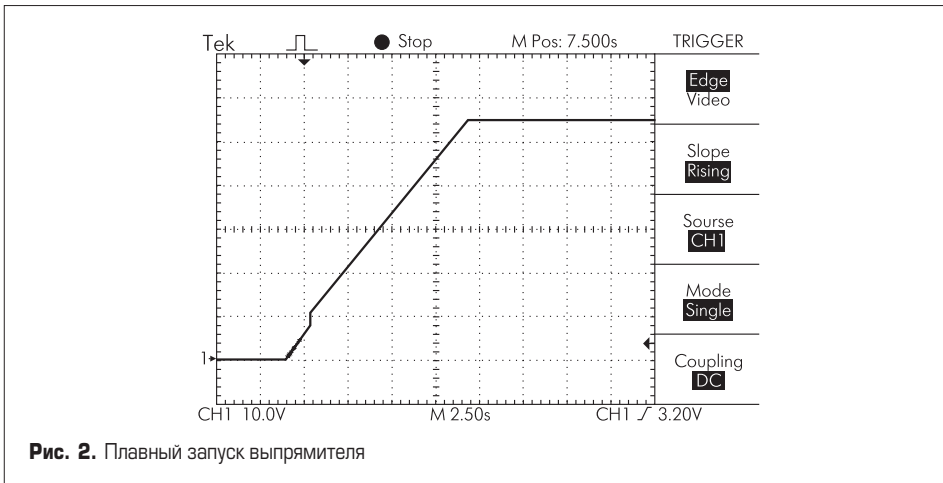


Рис. 2. Плавный запуск выпрямителя

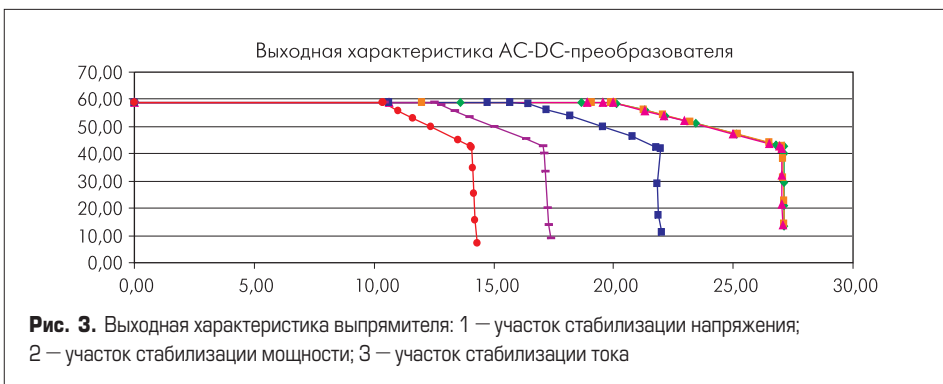


Рис. 3. Выходная характеристика выпрямителя: 1 — участок стабилизации напряжения; 2 — участок стабилизации мощности; 3 — участок стабилизации тока

нии. Нарастающий по току во время запуска сигнал формируется микропроцессором.

На рис. 2 показан плавный запуск выпрямителя при полной нагрузке, получаемый с помощью нарастания опорного сигнала по току.

Вид выходной характеристики (зависимость  $U_{\text{вых}}$  от  $I_{\text{н}}$ ) зависит от назначения выпрямителя и при некоторых требованиях к нему может содержать три участка: стабилизации напряжения, мощности и тока. Вид этой характеристики устанавливается фиксированным, если диапазон напряжений сети сравнительно узкий (например, допуск  $\pm 20\%$  от номинального значения). При большом диапазоне напряжения сети, вызываемом непродолжительными и значительными провалами, можно снизить предельную мощность и, соответственно, ток на выходе, начиная с некоторого выбранного порогового напряжения сети. Например, при возможном диапазоне изменения сети 85–300 В пороговое напряжение может быть выбрано 175 В. При напряжении сети  $\geq 175$  В предельная мощность (и выходной ток выпрямителя) сохраняются неизменными, а при уменьшении этого напряжения мощность на выходе снижается с заданным коэффициентом кратности. К примеру, при  $U_{\text{сети}} = 85$  В предельная мощность может составлять 40, 50 или 70% от максимально возможной. Такое построение выпрямителя, если не требуется работа от универсальной сети с полной мощностью, позволяет не увеличивать число транзисторов и диодов в ККМ, размеры дросселя и поверхность радиаторов этого узла, что, в конечном счете, не приводит к увеличению объема и массы выпрямителя. Алгоритм работы микропроцессора для выполнения данной задачи сводится к расчету опорного тока,

передаваемого в соответствующий усилитель через ЦАП.

На рис. 3 показаны предельные выходные характеристики выпрямителя, состоящие из трех участков стабилизации. Возможные выходные напряжения в режиме стабилизации  $U_{\text{вых}}$  не показаны.

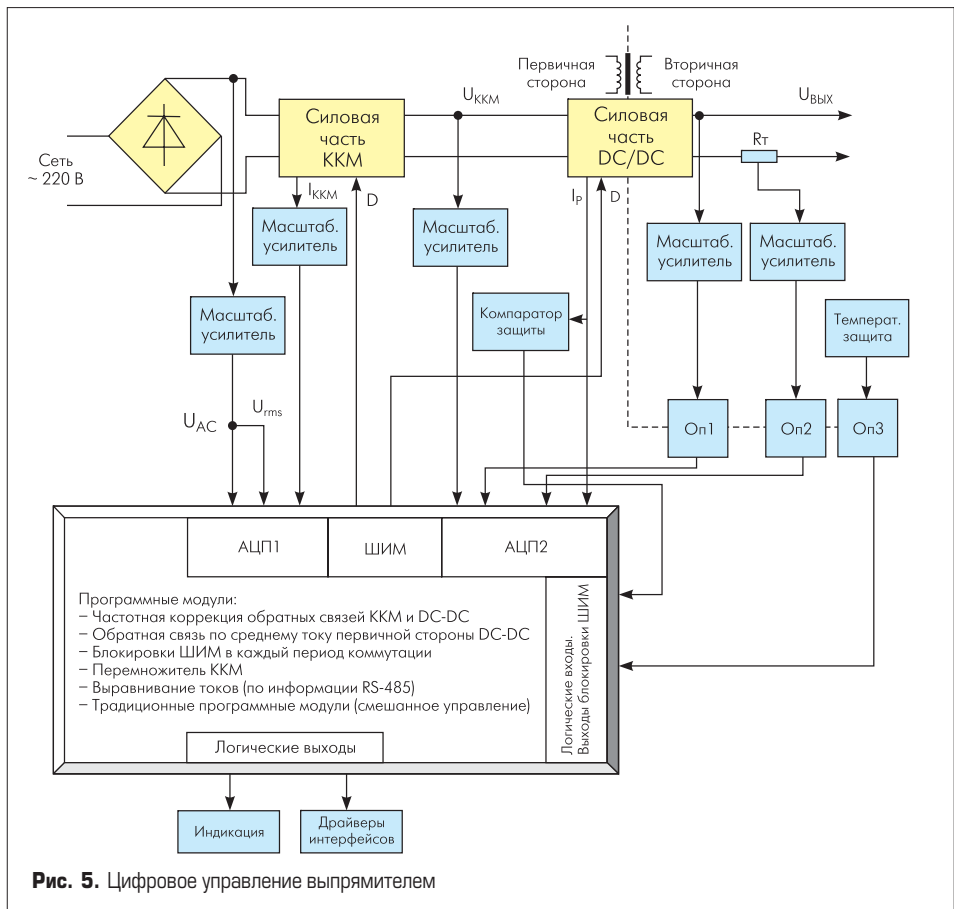


Рис. 5. Цифровое управление выпрямителем

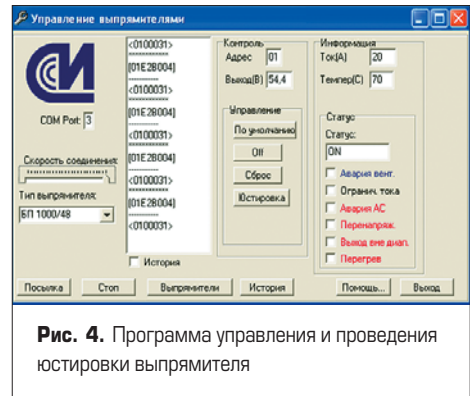


Рис. 4. Программа управления и проведения юстировки выпрямителя

В данном выпрямителе предельная мощность снижается пропорционально уменьшению сетевого напряжения, если последнее меньше 175 В.

Измеренные выходные напряжения и токи выпрямителей, работающих в системе бесперебойного питания, передаются в систему управления верхнего уровня с помощью любого протокола, например RS-485. Для этого используется интерфейс UART микропроцессора каждого выпрямителя и внешние драйверы RS-485. Для управления системой верхнего уровня может быть использован микропроцессорный блок или персональный компьютер. С его помощью можно не только управлять выпрямителями, но и выполнять необходимые юстировки в процессе производства выпрямителей. На рис. 4 показано окно для персонального компьютера, позволяющее диагностировать и юстировать выпрямители, а также выполнять необходимый контроль.

Пример построения полностью цифровой системы управления выпрямителем показан на рис. 5.

Представленная структура предполагает использование цифрового сигнального процессора, который представляет собой процессор с 32-разрядной арифметикой, частотой 100 МГц и флэш-памятью. Арифметические возможности данного DSP позволяют выполнять за один такт две операции умножения  $16 \times 16$  с накоплением. Такое быстрое действие позволит управлять выпрямителем с частотой коммутации до 300 кГц и более.

Рассмотрим подробней работу выпрямителя по схеме, представленной на рис. 5. Для управления ККМ через масштабирующие усилители и делители на АЦП приводится выпрямленное напряжение сети, выходное напряжение и ток ККМ. Используя эту информацию, процессор формирует закон изменения  $D$  (коэффициент заполнения) следующим образом: выходное напряжение сравнивается с константой, характеризующей опорное напряжение, полученная ошибка обрабатывается с помощью цифрового фильтра. Далее полученное значение перемножается на сигнал, характеризующий форму напряжения сети, и делится на квадрат действующего значения сетевого напряжения. Все величины в процессоре представляются в виде условной относительной единицы, то есть приводятся к максимальному значению. Например, если  $U_{\text{ККМ, max}}$  — максимальное напряжение на выходе корректора, то величина, характеризующая  $U_{\text{ККМ}}$ :

$$U_{\text{ККМ}}^* = K_g \times K_M \times U \beta_{\text{ККМ}};$$

$K_g$  — коэффициент делителя;

$K_M$  — коэффициент масштабирования;

$$1 = K_g \times K_M \times U \beta_{\text{ККМ, MAX}};$$

$$K_M = \frac{1}{K_g \beta_{\text{ККМ, MAX}}};$$

$$U_{\text{ККМ}} = \frac{1}{U_{\text{ККМ, MAX}}} \times U \beta_{\text{ККМ}}.$$

При 16-битном представлении все величины преобразуются в формат 1.15, например: 1 соответствует 32767; 0,3 соответствует 9830.

Полученная величина после перемножения является опорной для токового сигнала, поэтому после сравнения с токовым сигналом величина ошибки обрабатывается с помощью второго цифрового фильтра, выходная величина которого является задающей для ШИМ-контроллера DSP. Защиты ККМ выполняются следующим образом: защита по напряжению сети обеспечивается с помощью сигнала формы тока, защита по выходному напряжению также обеспечивается через АЦП. Для защиты по току используется внешний компаратор, который воздействует на ШИМ-контроллер.

Для управления DC/DC-преобразователем используются масштабирующие усилители и оптроны, передающие аналоговый сигнал на первичную сторону выпрямителя. В качестве оптронов желательно применять диод-диод оптроны AlGaAs, в которых используются обратные связи для обеспечения стабильных параметров. Алгоритм управления реализуется с помощью двух цифровых фильтров, получающих сигналы выходного напряжения и тока. Первичный ток преобразователя используется для двух задач: первая — получение оптимальной частотной коррекции при смешивании сигнала ошибки по выходному напряжению и усредненного тока первичной стороны DC/DC-преобразо-

вателя, вторая — обеспечение защиты по току в каждый период коммутации с помощью внешнего компаратора.

Кроме того, DSP выполняет все остальные задачи, характерные для смешанного управления. Для выравнивания токов выпрямители используют информацию о токе каждого выпрямителя, полученную по RS-485.

ПЦСУ, по-видимому, получают преимущества по сравнению с ССУ, что наиболее весомо будет проявляться в определенных диапазонах выходной мощности выпрямителей и в определенных областях их применения.

В настоящее время развитие микроконтроллерной техники, применяемой в силовой электронике и, в частности, в транзисторных выпрямителях, происходит со значительным опережением по сравнению с аналоговой. Наблюдается постоянное снижение стоимости микроконтроллеров, обусловленное их универсальностью и расширяющимися областями применения.

При усложнении задач, решаемых системами управления транзисторными выпрямителями, применение микроконтроллеров позволяет создавать гибкую и универсальную систему новыми средствами при практически не изменяемой стоимости изделия.

#### Литература

1. 8-bit AVR Microcontroller with 8K Bytes In-System Programmable Flash. ATmega8535. Product Datasheet. Atmel Corp. 2003.
2. Choudhury S. Average Current Mode Controlled Power Factor Correction Converter using TMS320LF2407. Application Note SPRA902A. Texas Instruments. 2003.