

УДК 681.5

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГЭС МАЛОЙ МОЩНОСТИ МЕТОДОМ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

А. А. Миленин,

аспирант

В. Ф. Шишлаков,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Приводится один из подходов к разработке системы управления гидроэлектростанцией малой мощности методом частотного регулирования. Дается сравнительный анализ с существующей системой управления методом управляемой нагрузки. Показано моделирование системы управления малой гидроэлектростанцией в MATLAB, Simulink.

Ключевые слова — малые ГЭС, частотное регулирование, моделирование, MATLAB.

Одним из наиболее эффективных направлений развития нетрадиционной энергетики является строительство микро- и малых гидроэлектростанций (МГЭС). Это объясняется значительным экономическим потенциалом малых рек (в России он составляет до 60 млрд кВт · ч, а используется менее чем на 0,5 %) при сравнительной простоте его реализации. Именно поэтому в 50–60-е гг. в стране работало до 8 тыс. МГЭС. Сегодня же их количество едва достигает 300 [1, 2].

Необходимость снабжать электроэнергией труднодоступные районы, в которые прокладка линий передач предполагает большие сложности или требует серьезных денежных вложений, позволяет ставить вопрос о целесообразности использования электростанций малой мощности. При этом возникает потребность к развитию нетрадиционной или возобновляемой энергетики.

В отличие от других экологически безопасных возобновляемых источников электроэнергии, таких как солнце, ветер, МГЭС практически не зависит от погодных условий и способна обеспечить устойчивую подачу электроэнергии потребителю.

Таким образом, малая гидроэнергетика — это в настоящее время наиболее экономичное решение энергетических проблем для территорий, относящихся к зонам децентрализованного электроснабжения, которые составляют более 70 % территории России.

Задачей данной работы является разработка системы автоматического управления (САУ) гидроэлектростанцией мощностью 250 кВт. Необходимо обеспечить требуемые параметры выходной мощности, стабилизации напряжения и частоты в соответствии с ГОСТ 28171 (МЭК 60034-1).

Для системы управления входным воздействием в данном случае будет являться информация о требуемой частоте и амплитуде напряжения, а также текущие параметры этих значений, а выходным — сигналы управления силовыми ключами преобразователя тока. Необходимо, чтобы система управления обеспечивала работу ГЭС как в автономном режиме или параллельно с энергосистемой, так и на сеть, в том числе функции защиты и оперативного управления агрегатами ГЭС. Станция должна обладать автономностью.

Существуют разные способы стабилизации напряжения и частоты. К ним относятся: использование насыщенной индуктивности; управление напряжением путем регулирования скорости потока воды; регулирование напряжения с помощью управления емкостью; регулирование напряжения и частоты с помощью управляемой нагрузки, преобразователя частоты и некоторые другие способы. Наиболее предпочтительными методами являются регулирование с помощью управляемой нагрузки и частотное регулирование.

В данный момент реализован принцип постоянного момента реализован принцип постоянного момента реализации. Мощность, вырабатываемая ге-

нератором, распределяется между полезной нагрузкой и балластной. В результате за счет постоянства нагрузки и мощности выполняются требования к параметрам электрического тока.

Рассмотрим микроГЭС мощностью 15 кВт, использующую асинхронный генератор. Для управления данной микроГЭС разработана серия устройств автоматического регулирования (УАР) (рис. 1).

В качестве генератора Γ в микроГЭС применяется асинхронная машина, которая возбуждается от остаточного магнитного потока статора при раскручивании турбины. Конденсаторная батарея (устройство возбуждения $УВ$) подключается с помощью выключателя $В$ к выводам генератора. Для того чтобы сделать напряжение на выходе генератора постоянным и не зависящим от нагрузки, используется устройство управления $УУ$, представляющее собой широтно-импульсный модулятор $ШИМ$.

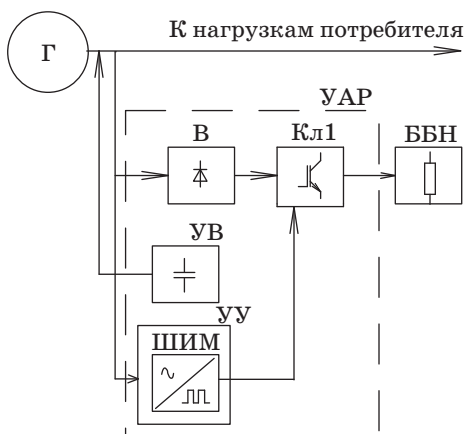
Работа $УАР$ основана на принципе постоянства выходного напряжения, которое во многом зависит от нагрузки и может меняться в широких пределах. Мощность генератора перераспределяется между балластом (блоком балластной нагрузки $ББН$) и полезной нагрузкой таким образом, что выходное напряжение остается постоянным. Мощность, развиваемая генератором, также остается постоянной:

$$P_{\Gamma} = P_{\text{н}} + P_{\text{б}} = P_{\text{max}} = \text{const}, \quad (1)$$

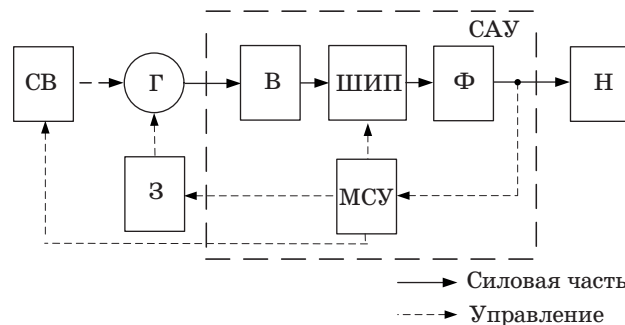
где P_{Γ} , $P_{\text{н}}$, $P_{\text{б}}$ — мощность, развиваемая на выходе генератора, отдаваемая в нагрузку, рассеиваемая балластом соответственно.

Рассмотрим работу разрабатываемой САУ МГЭС (рис. 2).

Неуправляемый трехфазный мостовой выпрямитель $В$ выпрямляет переменное напряжение, вырабатываемое генератором Γ (напряжения на



■ Рис. 1. Функциональная схема УАР



■ Рис. 2. Функциональная схема САУ

выходе выпрямителя $U_{2\text{дл}} = 1,41 \cdot 380 = 536$ В при номинальном режиме работы генератора). Реверсивный широтно-импульсный преобразователь тока (частоты) $ШИИП$ осуществляет реализацию заданного закона управления (амплитуда напряжения может изменяться в диапазоне от -500 до 500 В, частота — от 1 до 500 Гц).

Выходной фильтр Φ предназначен для подавления высокочастотных составляющих напряжения нагрузки $Н$. Цифровые измерители сети ведут непрерывный анализ параметров тока и напряжения и позволяют использовать эти данные в микропроцессорной системе управления $МСУ$, которая в свою очередь, исходя из полученных данных, управляет силовыми ключами. Также $МСУ$ управляет приводом предтурбинного затвора $З$ с помощью преобразователя частоты и системой возбуждения $СВ$ генератора. В целях управления потоком воды, поступающей в гидротурбину, привод должен регулировать положение задвижки на малых оборотах вращения.

Таким образом, $МСУ$ МГЭС обеспечивает регулирование напряжения и частоты в широком диапазоне, что позволяет без изменения конфигурации системы применять ее в различных странах с различными стандартами напряжения и отклонения частоты.

Основным силовым элементом системы является $ШИИП$, который и преобразует полученный ток с генератора с переменной частотой и амплитудой напряжения в ток постоянной частоты и амплитуды.

Применение IGBT с более высокой частотой переключения в совокупности с $МСУ$ в преобразователях частоты снижает уровень высших гармоник, характерных для тиристорных преобразователей [3–5].

Для реализации преобразователя частоты, выполненного на IGBT-транзисторах, были выбраны IGBT-модули EUPEC FZ1600R12KE3 с напряжением коллектор-эмиттер 1200 В и током коллектора 1600 А (при 80 °С) и 2300 А (при 25 °С) [6, 7]. Расчет суммарных потерь на плече преобразователя частоты составил $3,7$ кВт.

В состав любого мощного преобразователя обязательно входит драйвер — устройство, осуществляющее передачу логических сигналов управления, вырабатываемых контроллером, к входам силовых ключей [5].

В настоящей работе был выбран драйвер International Rectifier [5, 8]. IR2113 — драйверы высоковольтных, высокоскоростных МОП-транзисторов или IGBT-транзисторов с независимыми выходными каналами нижнего и верхнего уровней. Собственная HVIC-технология и стойкая к защелкиванию КМОП-технология позволили создать монолитную конструкцию [8].

Логический вход совместим с стандартными КМОП- или LSTTL-выходом. Выходы драйверов отличаются высоким импульсным током буферного каскада, что выполнено для минимизации встречной проводимости драйвера. Задержка при распространении сигналов согласована для применения в высокочастотных приложениях. Выходной канал может быть использован для управления N -канальным силовым МОП-транзистором или IGBT-транзистором с напряжением питания верхнего уровня до 600 или до 1200 В [8].

В качестве выходных фильтров в инверторах используются преимущественно электротехнические устройства, схемы которых представляют собой пассивные четырехполюсники, состоящие из индуктивных и емкостных реактивных элементов [4]. Основные функции фильтра заключаются в максимальном уменьшении напряжений высших гармоник при минимальном ослаблении первой (основной) гармоники выходного напряжения.

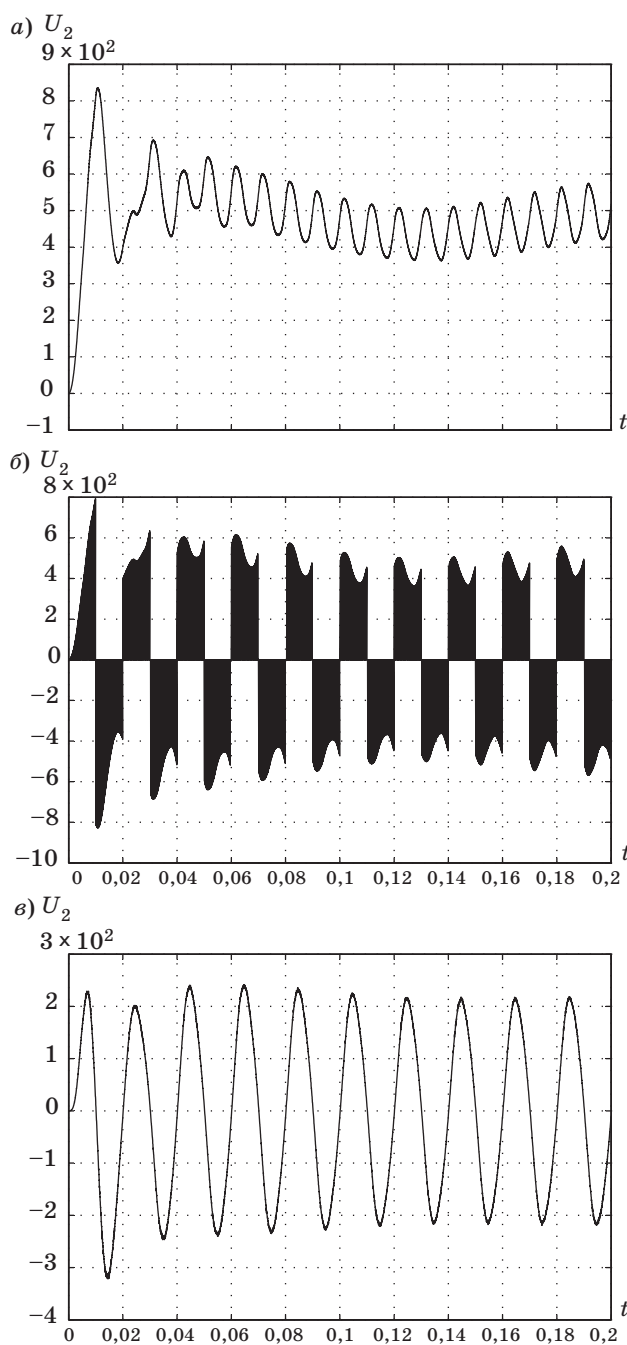
Наиболее простым фильтром является однозвенный Г-образный LC-фильтр. Принцип действия его основан на том, что для высших гармоник напряжения индуктивность представляет большое сопротивление, а емкость — малое. В результате высшие гармоники ослабляются в большей степени, чем первая (основная) гармоника напряжения [4].

Для ориентировочного расчета параметров фильтра следует исходить из условий резонанса и далее проверять параметры фильтра на модели.

Емкость C конденсатора принимаем равной 700 мкФ, а индуктивность дросселя находим из условия равенства волнового сопротивления фильтра сопротивлению нагрузки для исключения резонансных явлений на одной из высокочастотных гармонических составляющих. По расчетам индуктивность дросселя $L = 26$ мкГн.

С помощью модели проверяем параметры выходного фильтра (рис. 3, а—в).

Видим, что напряжение на нагрузке имеет синусоидальный характер с некоторыми незначительными искажениями, которые не влияют на качество тока.



■ Рис. 3. Результаты моделирования параметров выходного фильтра: а — выпрямленное напряжение; б — напряжение на нагрузке без выходного фильтра; в — напряжение на нагрузке с применением выходного фильтра

Исходя из функций разрабатываемой МСУ, а также представляя себе функции, лежащие на устройстве управления, т. е. на микроконтроллер, мы выбрали микроконтроллер Atmel серии Mega, а именно Mega6490. Это устройство обладает достаточными ресурсами для управления ГЭС малой мощности, минимальной стоимостью

среди устройств подобного класса, малыми габаритами, является простым в использовании.

Микроконтроллер Mega649 имеет центральный 8-разрядный процессор; память программ объемом 64 КБ; память данных объемом 2 КБ; 53/68 программируемых ввода/вывода; два 8-битовых и один 16-битовый многорежимных таймера/счетчика; систему прерываний с пятью векторами и двумя уровнями; последовательный интерфейс; тактовый генератор [9–11].

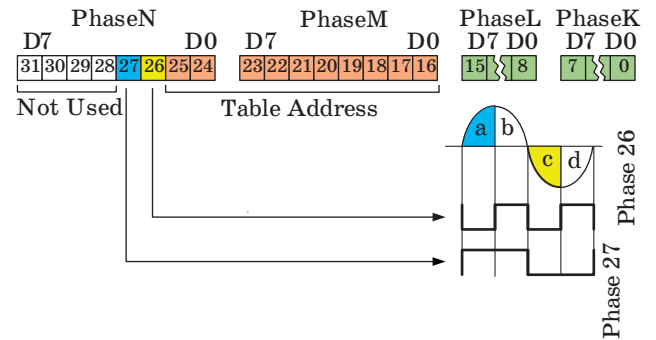
Рассмотрим алгоритм генератора синусоидального сигнала, который необходим для реализации всей работы.

Алгоритм целиком реализован внутри прерывания таймера, которое возникает с частотой 250 кГц, т. е. каждые 4 мкс. Столь малое значение времени потребовало предельной оптимизации обработчика. 1 КБ объема памяти программ контроллера отведен для хранения таблицы функции \sin . Для экономии места хранится только 1/4 часть периода, так как функция \sin обладает свойствами симметрии. Однако в результате несколько усложнился алгоритм. Для увеличения скорости работы в таблице хранятся 8-разрядные отсчеты. Поскольку на 1/4 периода знак функции не меняется, это позволило знаковый разряд в таблице не хранить.

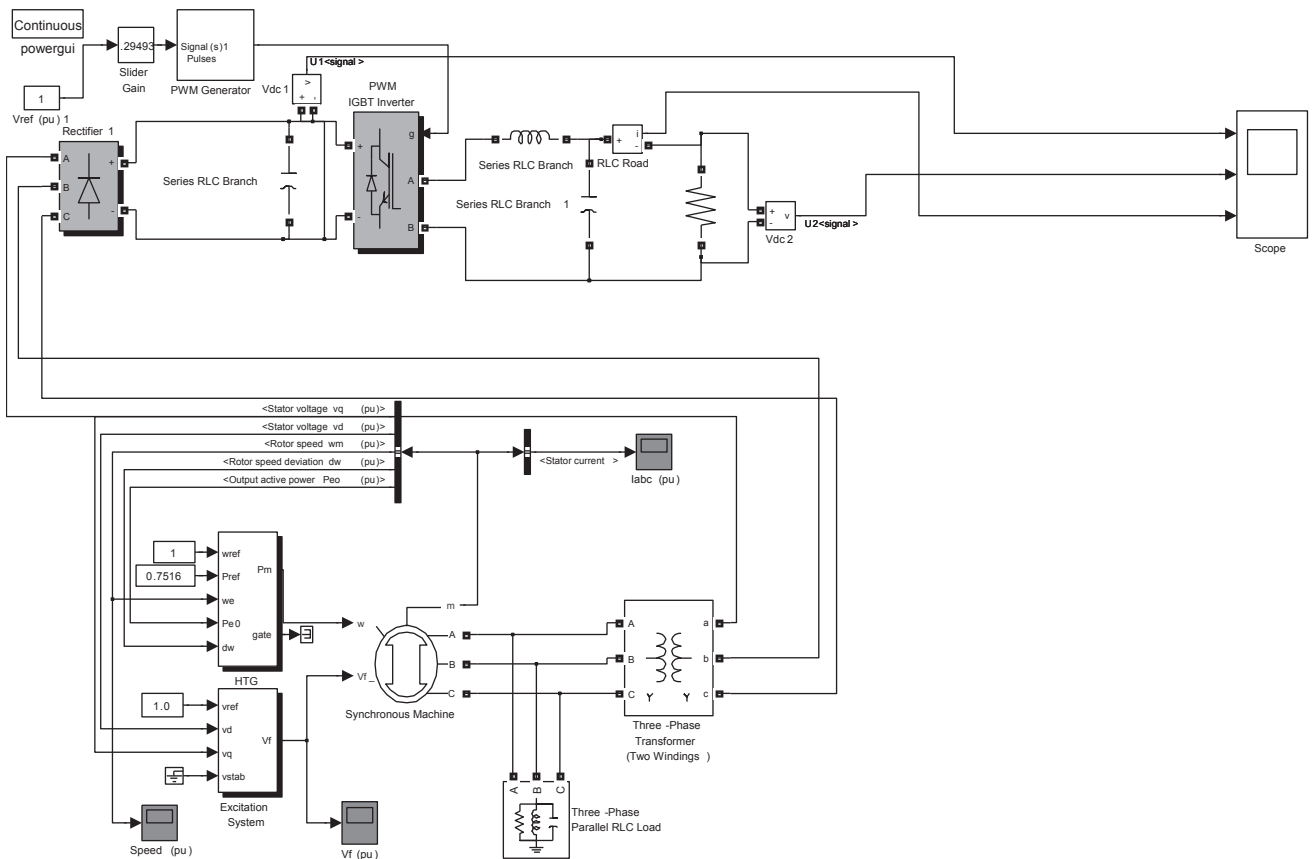
В разных четвертях периода \sin обработчик прерывания работает по различным веткам. Очень важно при этом обеспечить равное время выполнения каждой ветки.

Мгновенная фаза хранится в регистрах PhaseK, L, M, N. Из 32 бит используются только 28 младших. Приращение фазы (код частоты) хранится в регистрах FreqK, L, M, N. Поскольку таблица функции \sin имеет размер 1024 Б, необходим 10-разрядный адрес. Он формируется из разрядов 16–25 мгновенной фазы (рис. 4).

Разряд 26 определяет, длится первая или вторая половина полупериода. На второй половине полупериода направление изменения функции



■ Рис. 4. Схема приращения фазы

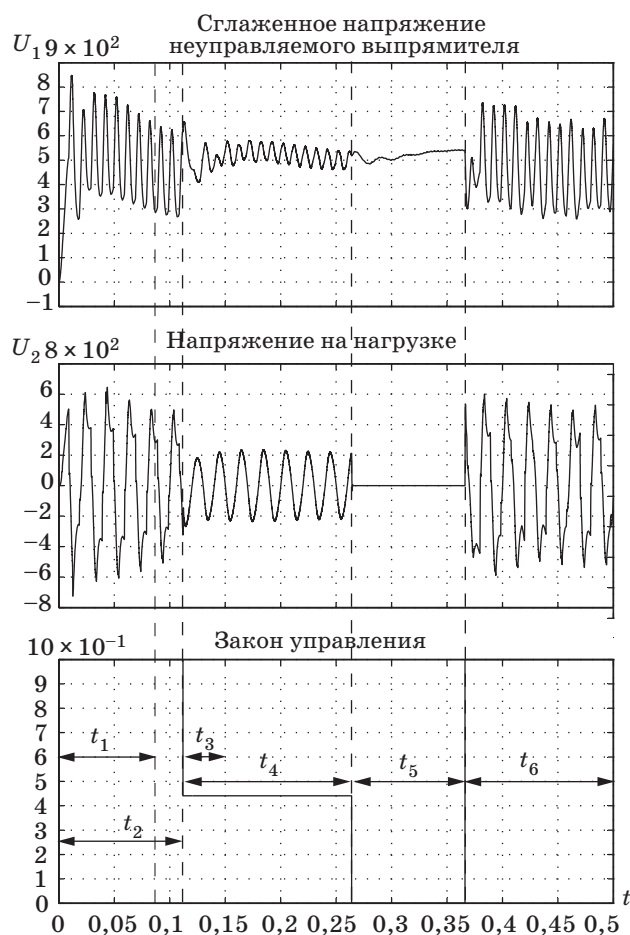


■ Рис. 5. Модель САУ МГЭС

должно меняться на противоположное, для чего в этом случае адрес инвертируется. Разряд 27 определяет, длится положительный или отрицательный полупериод. По сути, это знаковый разряд.

Работа САУ смоделирована с помощью программных пакетов MATLAB Simulink и System Blockset. Модель, работающая параллельно с генератором 250 кВт, показана на рис. 5. Система возбуждения моделируется блоком Excitation System. Частота и напряжение задаются блоком гидротурбины (НТГ). Напряжение с выхода генератора поступает на модель 3-фазного неуправляемого выпрямителя. Форма напряжения определяется блоком PWM Generator, который подает управляющие импульсы на PWM IGBT Invertor. Сглаживающие фильтры моделируются блоками Series RLC Branch. Блок RLC Load является моделью нагрузки [12].

Результаты исследования модели МГЭС и графики переходных процессов по напряжению представлены на рис. 6. На третьем графике — закон управления. Как видно из графиков, время переходного процесса при включении генератора



■ Рис. 6. Переходные процессы МГЭС

$t_1 = 0,078$ с, в течение которого в системе устанавливаются незатухающие колебания заданной амплитуды и частоты ($U = 500$ В, $f = 50$ Гц). Моделирование работы САУ рассматривалось при различной скважности импульсов. На интервале t_2 скважность составляла 1, затем в процессе работы САУ на интервале t_4 скважность равна 0,38 (чтобы обеспечить амплитуду выходного напряжения $U = 220$ В), причем время переходного процесса $t_3 = 0,008$ с; t_5 — минимальное значение скважности, равное 0; t_6 — значение скважности, равное 1.

Результаты моделирования показали, что система обеспечивает установившиеся автоколебания заданной амплитуды и частоты. Изменение скважности управляемых импульсов позволяет регулировать амплитуду выходного напряжения при постоянной частоте.

Литература

1. Безруких П. П. Нетрадиционная возобновляемая энергетика состояние и ближайшая перспектива // Нетрадиционные возобновляемые источники энергии: Сб. / Под общей ред. П. П. Безруких / МЭИ (ТУ); ВИЭН. — М.: Амипресс, 2002. — 354 с.
2. Бляшко Я. И. Состояние и перспективы развития малой гидроэнергетики в России // Энергетическая безопасность и малая энергетика. XXI век: Материалы Всерос. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 3–5 декабря 2002 г. С. 135.
3. Джонс М. Электроника — практический курс. — М.: Техносфера., 2006. — 510 с.
4. Семенов Б. Ю. Силовая электроника от простого к сложному. — М.: Солон-Пресс, 2005. — 416 с.
5. Силовые полупроводниковые приборы: Пер. с англ. / Под ред. В. В. Токарева. — Воронеж, 1995. — 606 с.
6. Розанов Ю. К. Основы силовой электроники. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 296 с.
7. Сайт компании Infineon Technologies AG. <http://www.infineon.com>
8. Сайт компании Atmel Corporation. <http://www.atmel.com>
9. Голубцов М. С. AVR от простого к сложному. — М.: СОЛОН-Пресс, 2003. — 288 с.
10. Грампер В. Измерения, управление и регулирование с помощью AVR микроконтроллеров. — М.: МК-Пресс, 2006. — 208 с.
11. Сайт компании Atmel Corporation. <http://www.atmel.com> (дата обращения: 01.06.2009)
12. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника. — СПб.: Корона Принт, 2002. — 256 с.