

МОДЕЛИРОВАНИЕ АГРЕГАТОВ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

К.К. Крутиков*, В.В. Рожков*, В.Н. Иванов, Е.А. Перфильев****

**Филиал ГОУВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Смоленске*

***Филиал концерна «Росэнергоатом» «Смоленская атомная станция»*



В среде MatLab разработан пакет моделей агрегатов бесперебойного питания для атомных электростанций. Дается сравнительный анализ силовых схем и принципов управления агрегатов бесперебойного питания, выпускаемых разными фирмами. Приводятся результаты моделирования варианта АБП по одному из возможных сценариев работы. Даются выводы, облегчающие выбор оптимального варианта исполнения АБП.

Ключевые слова: управляемый выпрямитель, транзисторный автономный инвертор напряжения, агрегат бесперебойного питания, моделирование преобразователей, широтно-импульсная модуляция, регуляторы.

Key words: operated rectifier, voltage-source inverter, unit power supply, modeling of converters, pulse-width modulation, regulators.

Необходимое условие безопасности основного оборудования АЭС достигается многократным резервированием каналов электропитания нагрузок от нескольких независимых сетей [1–5]. Комплекс устройств, включающий в себя управляемый выпрямитель (УВ), фильтр выпрямителя (ФВ), аккумуляторную батарею (АБ), автономный инвертор (АИ), а также устройства автоматического переключения с одной сети – инверторной на другую – байпасную (АПУ-и, АПУ-б) и обратно, составляют агрегат бесперебойного питания (АБП) – рис. 1. Питание нагрузки при этом может осуществляться от инверторной сети, формируемой через входную сеть С1, УВ, АБ и АИ, или байпасной сети (С2). Коммутационные аппараты (К1–К5) обеспечивают разнообразные регламентные и ремонтные переключения в схеме. В штатном режиме все они замкнуты.

Схемы УВ большинства производителей схожи, а схемы выпускаемых АИ и их силовые ключи могут быть различными. В настоящее время в АБП применяются комбинированные тиристорные схемы АИ [1, 2]. При модернизации на Смоленской АЭС они заменяются современным поколением трехфазных мостовых транзисторных автономных инверторов напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [3–5]. В качестве АПУ продолжают применяться тиристорные ключи с их встречно-параллельным соединением.

Оборудование АБП для АЭС разрабатывается и наполняет рынок в условиях жесткой конкуренции [4]. Среди производителей АБП на рынке России и СНГ в

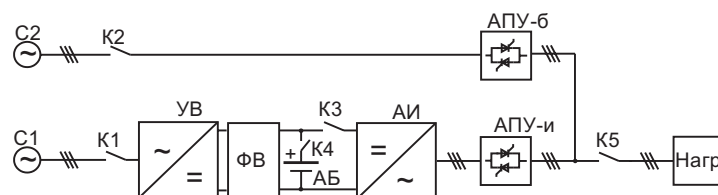


Рис. 1

настоящее время наиболее известны APC, Benning, Eaton Powerware, Gutor, General Electric, MGE, Mustek, PowerCom.

Различия принятых схемотехнических решений состоят в следующем:

- УВ выполняется как тиристорный с шестипульсным выходом либо как комбинированный двухмостовой с двенадцатипульсным выпрямлением, либо как транзисторный активный;
- АИ изготавливается как АИН с однофазными транзисторными ячейками, объединенными по выходу в трехфазную схему (12 ключей) с применением трех однофазных трансформаторов, либо по трехфазной мостовой схеме (6 ключей) и трехфазным выходным трансформатором;
- выходной инверторный трансформатор может выполняться по схемам Y–Y или Δ–Y;
- в принципах построения и элементной базе регуляторов систем управления для УВ и АИ;
- в составе сервисных функций визуализации, возможности управления по локальной сети.

Так, например, традиционный тиристорный мостовой выпрямитель производится фирмой Benning [7], двухмостовой выпрямитель с двенадцатипульсным выходом – Gutor [3], транзисторный активный выпрямитель, уменьшающий искажения в питающей сети, – Eaton Power Ware [5]. Инверторы с однофазными транзисторными ячейками производятся компанией Gutor, трехфазные мостовые шестиключевые инверторы – большинством других фирм. Подробные технические решения и детали, касающиеся построения схем управления преобразователями для АБП, для широкого потребителя в открытых каналах информации не приводятся.

Схема оборудования для АБП, поставляемого фирмой Benning на Смоленскую АЭС, представлена на рис. 2. Инверторные и байпасные тиристорные АПУ, показанные на схеме рис. 1, здесь отсутствуют, хотя конструктивно установлены в шкафу инвертора. Пунктиром на схеме обозначено оборудование АЭС, не входящее в АБП.

Схемы АБП прежних исполнений были досконально изучены, имелись испытательные стенды, подробная техническая документация устройств, научно-методическая литература. Сегодняшняя ситуация по этим вопросам значительно сложнее. Документация представляется фирмами-изготовителями менее подробной; в ней, как правило, не приведены принципы работы схем и устройств. Практически отсутствует техническая литература по современным схемам АБП. Возможность

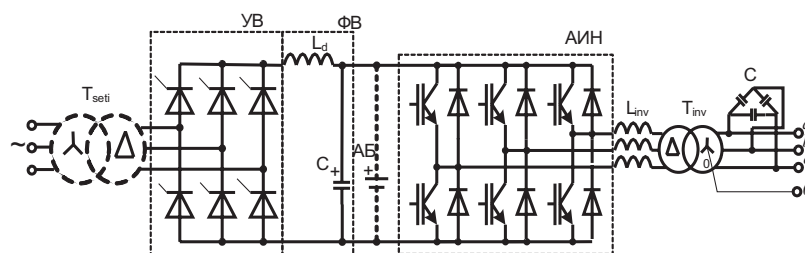


Рис. 2

иметь в лабораториях АЭС дополнительные блоки АБП для целей тренинга [6] ограничивается по экономическим соображениям.

Эти недостатки в значительной степени можно устранить созданием компьютерных моделей АБП, адекватно имитирующих все важнейшие режимы его работы. Наличие таких моделей и их эффективное использование как тренажеров дает возможность, кроме перечисленного, вести на равных переговоры с фирмами-изготовителями, грамотно формулировать технические требования на поставляемое оборудование, тщательно осмысливая все решения и возможные последствия.

Перед вводом АБП в эксплуатацию проводится комплекс испытаний. С использованием моделей можно вначале эти испытания отработать виртуально, подготовив тем самым персонал к реальному физическому эксперименту.

В статье представлены разработанные компьютерные модели АБП, методики их применения как тренажера для персонала АЭС, результаты моделирования, имеющие практическое значение.

В созданные тренажеры входят модели различных сетей с их параметрами; модели собственно АБП с разными вариантами топологии силовых схем (существующей, модернизируемой); модели нагрузок различного характера; модели различных алгоритмов управления всеми устройствами АБП, модели синхронизации инвертора с обводной сетью; модели различных штатных и аварийных ситуаций – короткие замыкания в нагрузке, обрывы цепей, нарушение функционирования силовых ключей.

По-видимому, нет смысла иметь модель со случайным характером набора ситуаций в работе АБП. Достаточно рассмотреть программируемое развитие событий. Первый вариант может быть таким:

- первичное включение выпрямителя и начальный заряд аккумуляторной батареи при отключенном инверторе;
- подключение инвертора ко входу постоянного тока в режиме холостого хода,
- включение нагрузки;
- изменение величины и характера нагрузки;
- короткие замыкания в нагрузке – симметричные или несимметричные;
- отключение сети, питающей выпрямитель;
- восстановление питающей сети.

В этих режимах можно обнаружить влияние принятой топологии силовых цепей разных производителей, настройки их элементов. Здесь же могут исследоваться влияния коэффициентов настройки регуляторов УВ и АИН. Можно исследовать условия подзаряда аккумуляторной батареи, качество выходной сети при изменениях со стороны входной сети и нагрузки, динамику процессов отработки скачков (длительности переходных процессов, уровни отклонений).

Второй вариант:

- питание заданной нагрузки от инверторной сети при наличии подзаряда аккумулятора и без такового;
- переход к питанию от инверторной сети к байпасной (обводной) по команде перехода;
- обратный переход питания от обводной сети к инверторной.

В этом режиме можно уделить внимание синхронизации инверторной сети с обводной, оптимальным алгоритмам управления тиристорами АПУ с целью исключения перерывов питания, возмущений нагрузки и сетей при возможных фазовых рассогласованиях. Здесь же можно проследить за стабилизацией напряжения на выходных клеммах инверторной сети при резких скачках нагрузки и пропадании подзаряда аккумуляторной батареи.

Разработанные модели позволяют рассмотреть и многие другие ситуации: аварии в элементах инверторной сети, различного типа короткие замыкания нагруз-

ки, отклонения напряжения сети, питающей выпрямитель, и т.д.

Работа моделей происходит при имитации реального времени.

Документальное представление результатов моделирования возможно в принятых стандартных формах.

Разработанная в среде MatLab универсальная базовая модель варианта выпрямительно-инверторного оборудования АБП (рис. 2) с транзисторным АИН показана на рис. 3.

В ней имеются все элементы, описанные выше, с конкретизацией решений, принятых производителем оборудования:

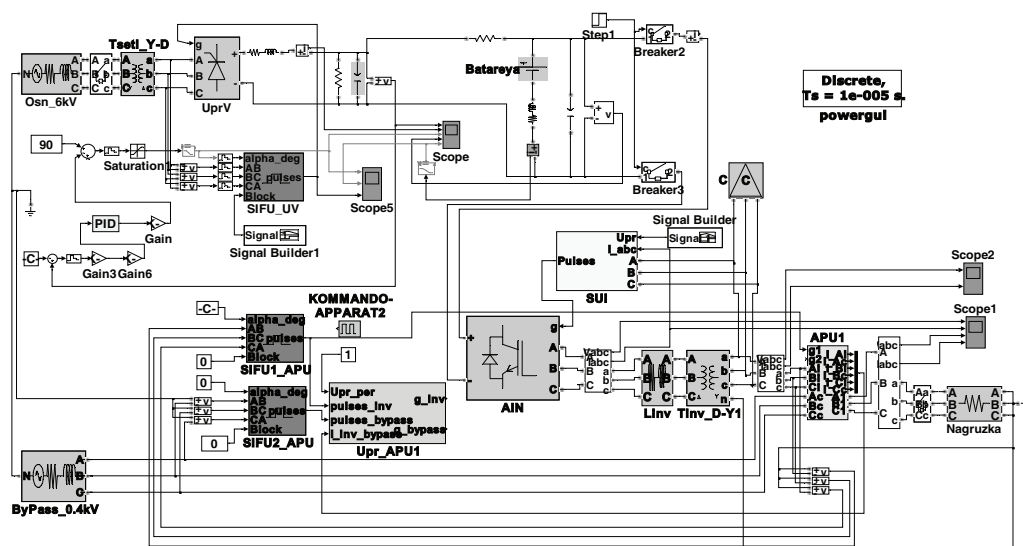


Рис. 3

- управляемый тиристорный выпрямитель (UprV), выполненный по трехфазной 6-пульсной мостовой схеме, питание которого осуществляется от понижающего трансформатора 6кВ/0.22кВ, являющегося одной из двух независимых сетей (трансформатор показан как Tset1);
- замкнутая система управления тиристорами УВ с обратной связью по напряжению и ПИД- регулятором (показана субмоделью SIFU UV и элементами регулятора PID);
- LC-фильтр выпрямителя с реальными параметрами (дроссель $L = 1.79$ мГн; конденсатор $C = 8800$ мкФ);
- аккумуляторная батарея с номинальным напряжением 220 В (Batareya);
- автономный транзисторный инвертор напряжения (субмодель AIN);
- замкнутая система управления транзисторными ключами инвертора в режиме высокочастотных переключений или на несущей частоте, или в скользящих режимах с релейным регулятором (субмодель SUI);
- трехфазный продольный дроссель на выходе инвертора 6 мкГн (LinV);
- трехфазный повышающий выходной трансформатор 140 В/400 В по схеме Δ -Y (TinV Δ -Y);
- батарея конденсаторов 110–330 мкФ на выходе инверторной сети по схеме Δ (субмодель C);
- автоматические переключающие устройства инверторной и байпасной сетей (субмодель APU1);
- схемы управления тиристорами инверторного и байпасного АПУ (субмодели SIFU1 APU и SIFU2 APU);

- логический блок управления двумя АПУ (субмодель Upg APU1);
- трехфазная нагрузка (Nagruzka);
- трехфазная питающая основная сеть C1 6 кВ (SI 6kV);
- байпасная обводная трехфазная сеть C2 380 В (By Pass 0.4 kV);
- коммутационная аппаратура, осуществляющая необходимые переключения в соответствии с рассматриваемыми режимами развития событий во времени. Она смоделирована аппаратно в виде силовых ключей, командоаппарата и программно в виде блоков Signal Builder1 и Signal Builder2, блокирующих импульсы управления выпрямителем и инвертором в нужные интервалы времени.

Данная модель может использоваться во всех опытах.

Моделирование переходов питания с инверторной сети на обводную и обратно можно производить и по упрощенной схеме, где главное внимание нужно уделить работе АПУ, когда осуществляется бесперебойное питание при отсутствии возмущений как для нагрузки, так и сетей. Инверторная сеть в этих экспериментах может быть представлена упрощенно как трехфазный источник с эквивалентными параметрами и фазовым рассогласованием с обводной сетью. При этом

- отключение выходящей из работы сети должно происходить в моменты перехода фазных токов через ноль для исключения коммутационных перенапряжений на имеющихся индуктивностях;

- включение вступающей в работу сети по каждой из фаз не должно происходить ранее отключения одноименных фаз выходящей из работы сети, иначе при фазовом рассогласовании сетей возникает междуфазное короткое замыкание.

Сети могут быть синхронизированы друг с другом при нулевом угле рассогласования ЭДС одноименных фаз или иметь заданный фазовый сдвиг.

Переход питания на новую сеть должен происходить так, чтобы ни в одной из фаз не возникло междуфазное короткое замыкание, когда тиристоры работавшей сети еще не закрылись при снятых импульсах управления, а тиристоры новой сети уже включились в тот же самый момент перехода на новую сеть по несвоевременной команде. Импульсы управления на тиристоры каждой фазы включающейся сети целесообразнее всего подавать по совместному условию появления собственно команды переключения на новую сеть и спаданию до нуля тока работавшей сети. Это означает, что переход всех фаз с работавшей ранее сети на новую будет происходить не одновременно, а по мере спада тока до нуля в каждой фазе сети, работавшей до команды перехода. Если этого не производить, то в моменты перехода могут происходить междуфазные короткие замыкания двух параллельно работающих сетей.

Пауза в токе каждой из фаз при этом может быть только в первую полуволну питания от нового источника, а далее эти токи будут синусоидальными с углом сдвига относительно фазного напряжения, определяемого углом нагрузки.

Известны варианты построения алгоритма управления тиристорами АПУ [7], когда при большом угле рассогласования принудительно формируется запрет на включение тиристора в работу сети, равное 1.5 периодам (30 мс), отсчитываемый от момента перехода напряжения через ноль одной из фаз отключаемой сети после имеющейся команды переключения. Этот вариант управления уступает описанному выше оптимальному.

На модели были проведены многочисленные эксперименты по всем описанным выше сценариям, различным вариантам топологии схем разных производителей, законов управления, типов регуляторов. В качестве примера таких компьютерных экспериментов на основании базовой модели рис.3 приводятся результаты исследования следующих режимов работы АБП схемы рис. 2:

- на интервале 0–1 с – заряд батареи в режиме холостого хода;

- 1 с – включение и синхронная работа АИН на холостом ходу с имеющейся байпасной сетью;
 - 1.5 с – подключение нагрузки к вторичным зажимам инверторного трансформатора,
 - 2 с – отключение основной питающей сети, так что интервал 1.5–2 с – питание инвертора от батареи при работающем выпрямителе и полной нагрузке;
 - 2.5 с – переход АБП на работу от байпасной сети; на интервале 2–2.5 с инвертор питается только от батареи при полной нагрузке с синхронизацией от байпасной сети; нагрузка отключается от инвертора, что переводит его в режим холостого хода;
 - 3 с – восстановление основной питающей сети, но нагрузка по-прежнему питается от байпасной сети. При этом АИН продолжает работать в режиме холостого хода с синхронизацией от байпасной сети, но уже при подзаряде батареи от УВ.
- Интерес представляет анализ следующих показателей.

1. Ток заряда батареи, который длительно не должен превосходить границы 1.5–5 А.

2. Стабилизация напряжения на нагрузке при питании от любого из источников.

Эти показатели зависят от регулятора выпрямителя, его структуры, настройки коэффициентов, выбора уставок уровня стабилизации напряжения.

3. Стабилизация выходного напряжения инверторного трансформатора при скачках нагрузки от номинальной до холостого хода.

4. Ограничение колебаний напряжения на батарее в допустимых пределах во всех режимах.

5. Возмущения на нагрузке при переходе питания от инвертора к байпасу.

Настройки элементов модели задаются в соответствии с параметрами реального оборудования [7]. Процессы в АБП представлены осциллограммами на рис. 4–6. Режимы работы оборудования АБП на соответствующих интервалах времени указаны на рис. 4.

Из представленных осциллограмм видно, что во всех смоделированных режимах работы получены ожидаемые результаты – осуществляется непрерывное питание нагрузки стабилизированным напряжением при пропадании (переход на байпасную сеть) и восстановлении основной сети, набросе и сбросе нагрузки (рис. 4 и 5), при работающем УВ обеспечивается подзаряд батареи малым стабильным

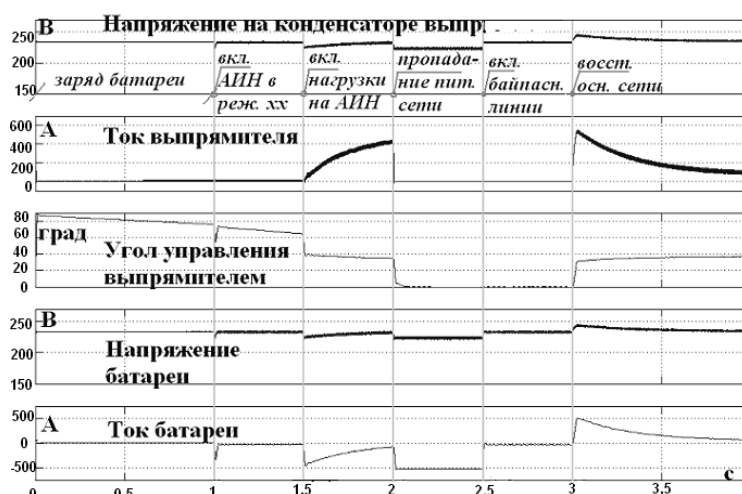


Рис. 4

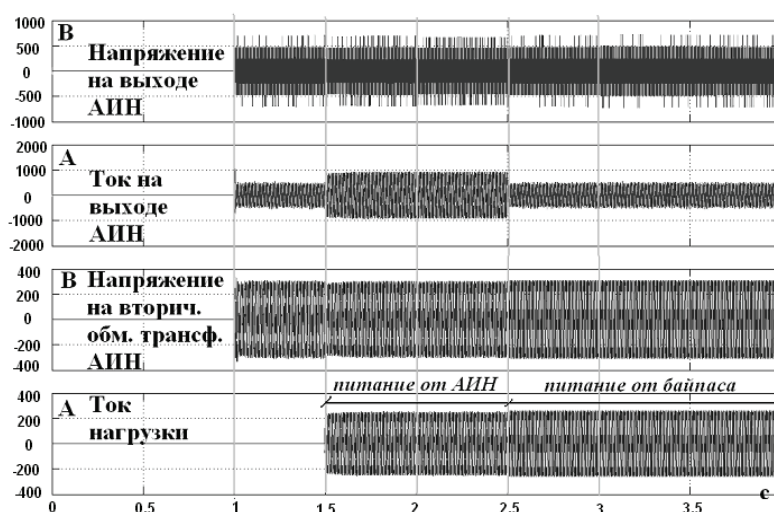


Рис. 5

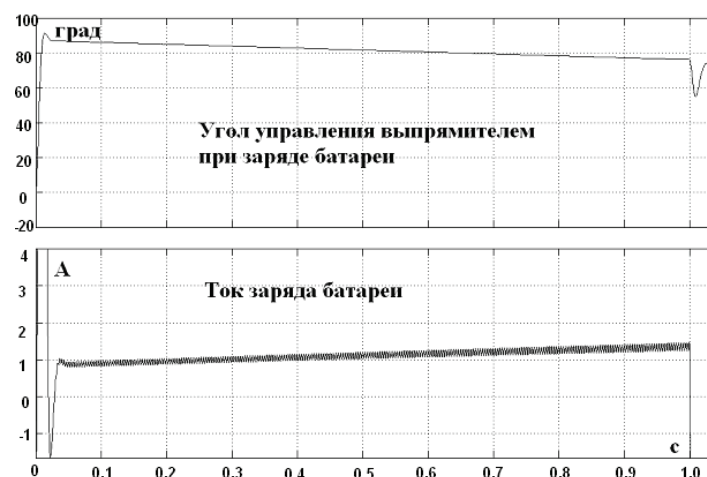


Рис. 6

током (рис. 6). Напряжение на нагрузочных зажимах инверторного трансформатора также стабилизировано, а его колебания в переходных процессах незначительны. Высокочастотная коммутация ключей АИН (см. рис.5) во всех режимах присутствует, что является необходимым условием синусоидальности выходного напряжения на нагрузке.

Регулирование УВ для стабилизации небольшого тока заряда батареи в пределах 1 А (рис. 6 – в режиме до включения инвертора) с требуемой точностью представляет собой отдельную важную задачу. Основной режим работы УВ – питание нагрузки через АИН с большими потребляемыми токами – должен сочетаться с режимом стабилизации малого тока подзаряда батареи.

Эксперименты (рис. 4–6) показывают, что АБП по принципиальным решениям схемы силовой части (рис. 2) и алгоритмам управления [7] может соответствовать вышеперечисленным требованиям как в статике, так и в динамике. Однако это справедливо при таком построении систем управления УВ, АИН и АПУ [7], когда обеспечивается их функциональное совпадение с решениями авторов моделей. В условиях существующих информационных ограничений, связанных с защитой интеллектуальной собственности, некоторые различия в моделях и их прототипах

есть и останутся в будущем. Окончательные выводы по эксплуатационным свойствам агрегата могут дать только натурные эксперименты на месте работы АБП.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ АБП РАЗЛИЧНЫХ ИСПОЛНЕНИЙ

1. При моделировании выявлено, что повышенные пульсации напряжения (тока) аккумуляторной батареи сверх допустимого уровня могут быть из-за неоптимальной структуры, неправильной настройки принятых регуляторов УВ. Сравнение предлагаемых рынком вариантов УВ как части АБП должно производиться с учетом этого показателя, возможностей настройки регуляторов в условиях эксплуатации и наличия соответствующих методик.

2. При применении трехфазного мостового транзисторного инвертора напряжения с высокочастотной коммутацией силовых ключей и выходным трехфазным трансформатором (вариант [7]) требуется детальный анализ и опытная проверка

- согласования параметров входного трехфазного дросселя с параметрами трансформатора;

- безусловного обеспечения высокочастотной коммутации при всех режимах, от холостого хода до предельно допустимых, как в статике, так и переходных процессах; особенно тщательно этот вопрос должен рассматриваться в случае применения чисто релейных регуляторов инвертора, когда возможно нарушение скользящего режима и срыва высокочастотных переключений;

- тщательного анализа всех режимов автономного инвертора напряжения в случае применения согласующего выходного трансформатора по схеме Δ -Y. Моделирование показывает, что задача стабилизации выходного напряжения в этой схеме может быть существенно затруднена.

3. Выявлено, что вариант применения однофазных ячеек инвертора, нагруженных на однофазные трансформаторы, вторичные обмотки которых для получения трехфазной сети соединены в Y (реализация [3]), более оптимален. Такое исполнение в смысле простоты управления, устойчивости работы, особенно в несимметричных режимах, имеет преимущества по сравнению с собственно трехфазным вариантом [7].

4. Наличие компьютерного тренажера дает возможность проверки правильности настройки уставок коммутационных аппаратов сети АБП в режимах коротких замыканий, что особенно актуально для таких сетей.

5. С применением разработанного пакета моделей возможно сокращение объема комплексных испытаний систем АБП.

Литература

1. Адамия Г.Г., Беркович Е.И. и др. Статические агрегаты бесперебойного питания/Под ред. Ф.И. Ковалева. – М.: Энергия, 1992. – 287 с.
2. <http://www.sbp-invertor.ru>. ОАО Завод Инвертор, Оренбург, 2009.
3. http://www.gutor.ch/ru/p_global_inv.htm. Официальный сайт Gutor, Швейцария, Берн, 2009.
4. Скляр В. Украинский рынок ИБП, или территория повышенного риска//Сети и бизнес. – 2007. – № 3 (34).
5. <http://www.rvip.ru/ups/978/981/document1010.shtml>. Оборудование для ИБП Eaton Powerware.
6. Черепанов В.А. Создание тренажеров на базе реального оборудования. Пресс-Центр атомной энергетики//Обучение. – 2003. – № 6.
7. <http://ru.benning.de>. «BENNING Elektrotechnik und Elektronik GmbH & Co KG». Беннинг Пауэр Электроникс. Официальный русскоязычный сайт Benning. 2010.

Поступила в редакцию 3.09.2010

conjugated problem of heat transfer in the pipe at constant heat flux from pipe wall and problem with heat release in the wall.

УДК 539.1.07:621.384.8

Plasma-optical three-division Spent Nuclear Fuel \V.M. Bardakov, Vo Nhu Dan, G.N. Kichigin, N.A. Strokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 10 titles.

For plasma-optical mass separator POMS-E-3 found the modes in which a separation of spent nuclear fuel into 3 parts, corresponding to two groups of fission products and transuranic elements. Proposed for the same purpose, a new plasma-optical mass separator POMS-CV, which excluded whirler.

УДК 621.039.5

Mastering of the fast sodium reactor technology. Construction of the BN-800 reactor \D.L. Zverev, B.A. Vasilev, V.Yu. Sedakov, N.G. Kuzavkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 13 pages, 6 tables, 6 illustrations. – References, 12 titles.

The main aim of the BN-800 reactor construction is the perfection of the closed fuel cycle. The measures to improve BN800 reliability, safety and economic performance as compared to its predecessor BN-600 are focused upon.

УДК 621.314.5

Modeling of Unit Power Supply of Nuclear Power Plant \K.K. Krutikov, V.V. Rozhkov, V.N. Ivanov, E.A. Perfilyev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 6 illustrations. – References, 7 titles.

In the soft of MatLab the package of the models is developed, allowing to investigate the basic modes of functioning of blocks of units of an uninterrupted food in updating for Nuclear Power Plant. The comparative analysis of units of the uninterrupted food which is let out by different firms is given, results of modeling of one of possible enough difficult scenarios of work of the unit are resulted.

УДК 621.039.566

Radiological Aspects of Nuclear Power Plant Accidents \V.A. Kutkov, V.V. Tkachenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 11 pages, 5 tables, 1 illustration. – References, 24 titles.

The article deals with international recommendations for the protection of the public in radiation emergency. Comparison of the rules and regulations of the Russian Federation, the governing radiation protection of workers and the public in the event of nuclear accidents at NPP, with relevant international guidelines, shows that this national system is not complete and requires a revision of the regulatory framework to bring it into compliance with IAEA safety standards.

УДК 621.039.548.5

Estimation of the WWER-1000 Fuel Element Cladding Damage Parameter Axial Distribution at Day Cycle Power Maneuvering \M.V. Maksimov, S.N. Pelykh, O.V. Maslov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 6 tables, 5 illustrations. – References, 7 titles.

A calculation estimation of the WWER-1000 fuel element cladding damage parameter axial distribution at day cycle power maneuvering, taking into account the fact that the fuel element axial segments and fuel assemblies differ greatly in their local linear heat rate jump and stationary power values, has been done. It has been obtained that on condition that the fuel element length is divided into eight equal axial segments, the sixth (counting from the core bottom) axial segment cladding durability limits the WWER-1000 operation time at day cycle power maneuvering.