

## МОДЕЛЬ ИСТОЧНИКА БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ АЭС

**В.В. Рожков, В.Э. Айдаралиева**  
*филиал ГОУВПО «МЭИ (ТУ)», г. Смоленск*



Работа содержит пакет моделей основных преобразовательных блоков современных систем бесперебойного питания (СБП) электрооборудования, которые поставляются на АЭС по планам продления срока службы энергоблоков. Подобные поставки часто сопровождаются очень ограниченной технической информацией об изделиях. Представленная работа в какой-то мере восполняет этот пробел. Разработан пакет моделей, позволяющий путем компьютерного моделирования исследовать основные режимы функционирования блоков в СБП. Приведены результаты моделирования, даются рекомендации по выбору параметров элементов силовой цепи, по диагностике и настройке регуляторов систем управления преобразователями – управляемым выпрямителем и транзисторным автономным инвертором.

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

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

На Смоленской АЭС (САЭС) ведутся активные мероприятия по продлению срока службы энергоблоков, связанные с модернизацией морально и физически устаревшего электрооборудования. Постепенное обновление преобразовательной техники (ПТ) для нужд бесперебойного питания АЭС включает в себя замену аналоговых систем управления преобразовательными агрегатами типа ПТС [1] на микропроцессорные. Силовая же часть при этом остается без изменений и содержит тиристорные управляемый выпрямитель (УВ) и инвертор, имеющий трехфазный конденсаторный компенсатор и индуктивно-тиристорный коммутатор, системы управления которыми строятся в соответствии с [1]. Этот этап модернизации на САЭС осуществлен. Дальнейшее обновление парка устаревших устройств направлено на полную замену агрегатов бесперебойного питания на новые, строящиеся на современных транзисторных IGBT-ключах с микропроцессорными системами управления. Планируемая модернизация инверторного оборудования СБП обязывает инженерный персонал лаборатории ПТ готовиться к ней при фактичес-

ком отсутствии эксплуатационной документации. Положение усугубляется отсутствием и подробной технической информации, которая часто ограничивается лишь рекламными проспектами с основными параметрами устройств. Поэтому персоналу лаборатории преобразовательной техники электроцеха АЭС целесообразно, используя доступные информационные каналы и возможности современных пакетов математического моделирования, выработать собственное подробное представление о новых СБП. Особое внимание следует уделить наиболее сложным устройствам новых СБП – транзисторным автономным инверторам напряжения (АИН), их свойствам, слабым местам и особенностям, связанным с влиянием настроек регуляторов на режимы работы. Эти материалы в официальных источниках отсутствуют. Полезно получить информацию о формах силовых напряжений, токов, сигналов в системе управления.

Указанные задачи удобнее решать при помощи компьютерного моделирования, например, в среде Matlab.

По информации фирм Gutor Electronic и ОАО «Инвертор», г. Оренбург [2, 3] современные мощные СБП строятся на базе транзисторных АИН. Хотя принципиальные решения относительно схем силовых частей и регуляторов в силу сложившихся рыночных отношений умалчиваются фирмами-изготовителями, все же некоторые общие сведения об этих решениях можно найти в материалах, доступных через сеть Интернет. Силовая часть систем бесперебойного питания указанных фирм содержит УВ и АИН. Рассмотрим каждое из этих устройств и систему в целом.

Один из вариантов силовых схем (рис. 1) для мощных СБП представляет собой тиристорный УВ и АИН с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и выходным двухобмоточным трансформатором.

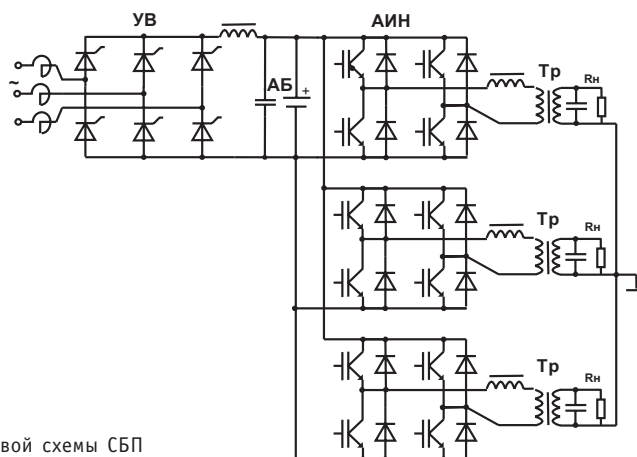


Рис. 1. Вариант силовой схемы СБП

Трехфазная схема АИН собирается из трех однофазных ячеек, трансформаторы которых соединяются в «звезду». Выпрямитель и инвертор снабжены системами управления с соответствующими регуляторами. Регулятор выпрямителя обеспечивает заданный закон заряда аккумуляторной батареи (АБ) и стабилизирует ее напряжение. Питание инвертора осуществляется либо от выпрямителя, либо непосредственно от АБ. Регулятор АИН поддерживает напряжение нагрузки стабильной частоты 50 Гц с номинальным действующим значением 220 В при изменении сопротивления нагрузки от холостого хода до предельно допустимого.

## УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Управляемый выпрямитель в новом поколении систем бесперебойного питания мало отличается от существующих в эксплуатирующихся ныне блоках УВ типа ПТС.

Модель управляемого выпрямителя, созданная в MatLab, приведена на рис. 2.

Для регулирования и стабилизации выпрямленного напряжения применяются системы с ПИД-регулятором. Рассмотрим влияние настроек регулятора на характер процессов стабилизации выпрямленного напряжения.

Модель (рис. 2) содержит трехфазную сеть 6 кВ, 50 Гц; трехфазный понижающий трансформатор 6/0,22 кВ (Y/Δ); трехфазный ключ, имитирующий возможное пропадание напряжения питающей сети; управляемый трехфазный выпрямитель, питающий АБ; нагрузка, имитирующая инвертор; система управления и регулятора управляемого выпрямителя.

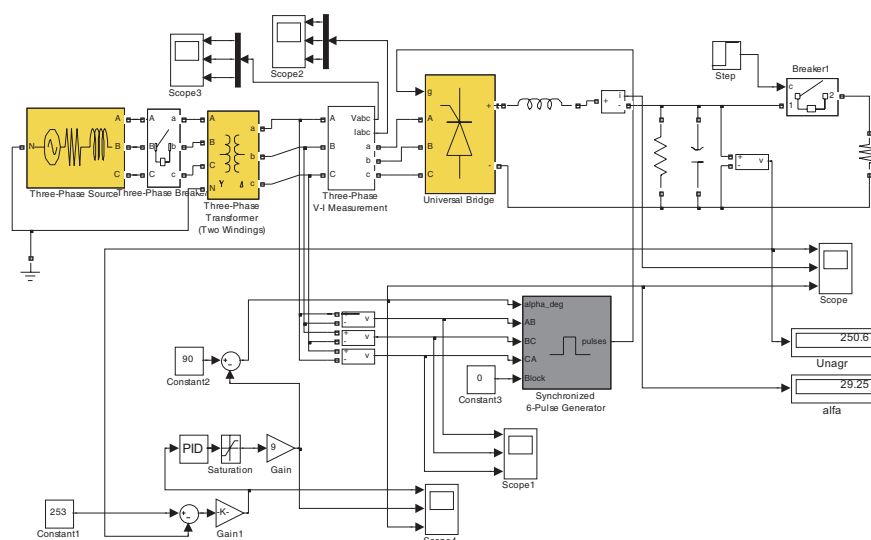


Рис. 2. Модель управляемого выпрямителя в MatLab

Параметры элементов силовой цепи, в основном, взяты совпадающими с таковыми для модернизируемой СБП: индуктивность сглаживающего дросселя  $L_d = 1.79$  мГн; емкость фильтрующего конденсатора  $C = 8800$  мкФ; сопротивление нагрузки может меняться в широком диапазоне, например, значение  $R_H = 0,5$  Ом соответствует мощности нагрузки  $U^2/R_H \approx 130$  кВт.

Выпрямитель с регулятором работает по-разному в зависимости от структуры принятого регулятора и его коэффициентов.

## Система управления выпрямителем

Угол управления выпрямителя в градусах определяется на выходе сумматора, где формируется разность между постоянной величиной  $90^\circ$  и усиленным в девять раз сигналом ПИД-регулятора. Этот сигнал и подается на СИФУ управляемого выпрямителя.

Эксперимент производится по следующей программе. Оператором устанавливаются желаемые постоянные величины: напряжение на конденсаторе выпрямителя, подлежащее стабилизации (253 В); напряжение срабатывания ключа, включающего нагрузку выпрямителя резистивного характера, имитирующую автономный инвертор, подключенный к конденсатору.

Параметры ПИД-регулятора выпрямленного напряжения: коэффициент пропорциональной части  $K_p=0$ ; коэффициент интегральной части  $K_i=1/T_i=150/4$  (1/с); коэффициент дифференциальной части  $K_d=0$ .

Все коэффициенты регулятора подлежат изменению, но интегральная составляющая обязательна, если необходимо избежать статической ошибки регулирования.

### Интегральный регулятор

Первоначальный вариант регулятора содержит одну интегральную составляющую. В случае пуска сразу с нагрузкой получены следующие результаты. При выбранной настройке регулятора сигнал на его выходе вначале равен нулю, при этом угол управления равен 90 градусов. Он постепенно уменьшается примерно до 20 градусов, обеспечивая плавное нарастание напряжения до заданной величины. Статическая ошибка регулирования при наличии интегральной составляющей в регуляторе равна нулю.

Если нагрузка подключается не сразу, а по достижении желаемого напряжения на конденсаторе, то присутствует лишь колебательный процесс перезаряда конденсатора.

### Влияние изменения настройки регулятора на характер процессов

Изменим величину интегральной составляющей регулятора. Пусть коэффициент интегральной части увеличился. При значительном увеличении его от исходной принятой величины наблюдаются существенные изменения в характере процессов. Так, при увеличении его в 16 раз до  $K_i=150 \cdot 4$  осциллограммы принимают вид, представленный на рис. 3а и б.

Видно, что переходный процесс заряда конденсатора становится колебательным, но пульсации выпрямленного напряжения носят еще регулярный характер с канонической частотой 300 Гц. Дальнейшее увеличение коэффициента интегральной части регулятора приводит к неустойчивости системы, проявляющейся в низкочастотных пульсациях выпрямленного напряжения и колебаниях напряжения на конденсаторе, колебаниях угла управления.

Включение нагрузки не сразу, а по достижении некоторого напряжения дает похожие процессы с большим перерегулированием выпрямленного напряжения относительно задания.

Таким образом, коэффициент усиления интегральной части должен находиться в определенных пределах. Чрезмерные пульсации в выпрямленном напряже-

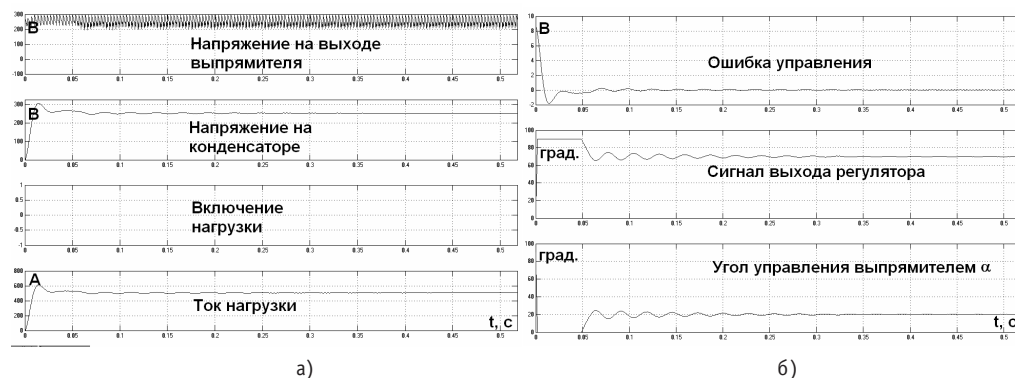


Рис. 3. Процесс пуска выпрямителя при увеличенном коэффициенте интегральной части регулятора

нии, выявленные персоналом лаборатории экспериментально на существующем оборудовании, могут свидетельствовать о превышении этого коэффициента сверх-допустимых значений.

### Пропорционально-интегральный регулятор

Введем пропорциональную часть в регулятор. Пусть  $K_p=1$ . Интегральную часть оставим при этом на исходном уровне  $K_i=150/4$ .

Процесс нарастания напряжения становится более быстрым. Статическая ошибка из-за наличия интегральной части по-прежнему равна нулю.

Увеличим коэффициент пропорциональной части регулятора до  $K_p=5$ . Процессы при этой настройке показаны на рис. 4а и б.

Видно, что в последнем случае имеется колебательный процесс заряда конденсатора с существенным перерегулированием, а в установившемся режиме наблюдаются автоколебания, проявляющиеся в пульсациях угла управления и, как следствие, в повышенных пульсациях выпрямленного напряжения. Таким образом, настройка пропорциональной части ПИД-регулятора также должна быть в допустимых пределах. Тогда процесс пуска может быть быстрее, чем в случае использования лишь интегральной части регулятора, с приемлемым качеством динамики.

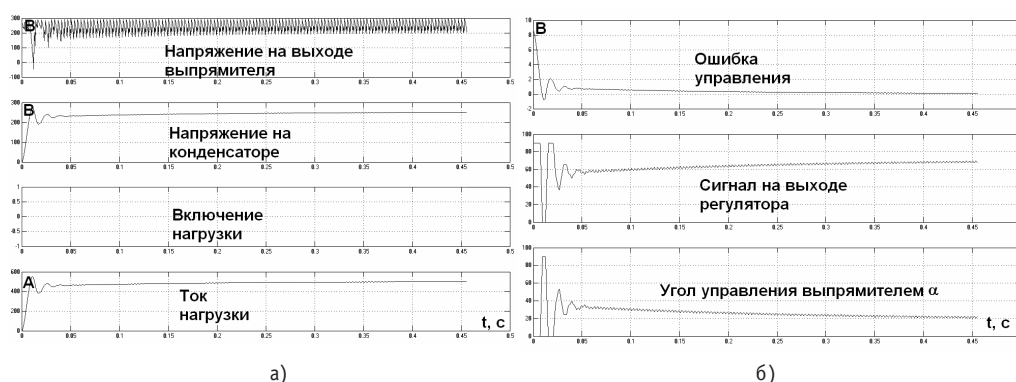


Рис. 4. Процессы пуска выпрямителя при ПИ-регуляторе с  $K_i=150/4$  и  $K_p=5$

## АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР НАПЯЖЕНИЯ

### Однофазный АИН

Модель однофазного АИН (рис. 5) содержит АБ, являющуюся источником питания; конденсатор АБ; четырехплечий транзисторный АИН на IGBT-ключях с обратными диодами; выходной двухобмоточный силовой трансформатор с дросселем в цепи входного дросселя и сглаживающей емкостью в выходной цепи нагрузки; нагрузку.

Параметры силовой цепи: номинальное напряжение АБ  $U_{\text{бат}}=253$  В; емкость конденсатора батареи 8800 мкФ; повышающий трансформатор с коэффициентом трансформации 1:2; дроссель во входной цепи трансформатора 20 мкГн; сглаживающая емкость во вторичной цепи трансформатора 500 мкФ; емкость на выходе диагонали инверторного моста 0.05 мкФ.

Требования к качеству выходного напряжения АИН: номинальное выходное напряжение 220 В (точность стабилизации +10%, -15%) частотой 50 Гц, коэффициент гармоник  $k_f \leq 5\%$ .

Особенности такого построения АИН следующие. Дроссель в первичной обмотке трансформатора нужен для подавления высокочастотных пульсаций тока при

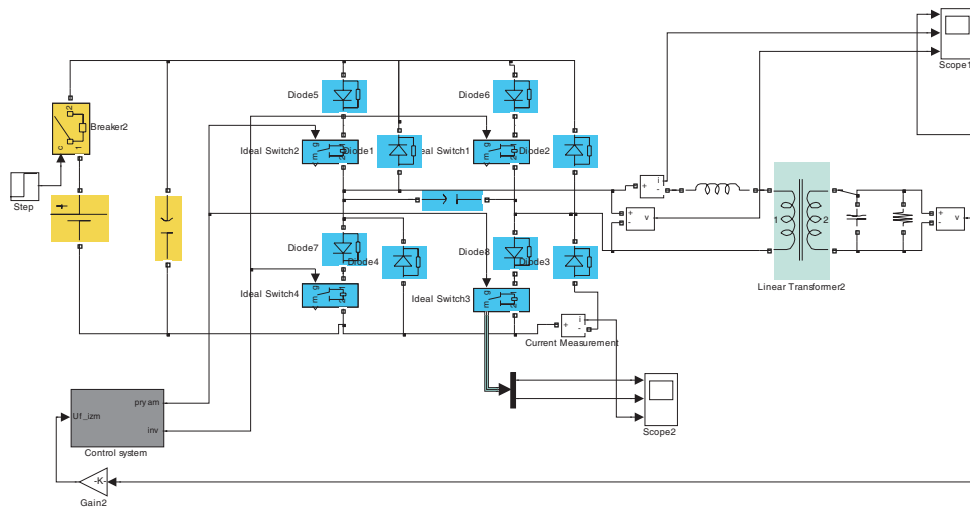


Рис. 5. Модель однофазного АИН в MatLab

высокочастотном ШИМ-управлении ключами инвертора. При его отсутствии работа инвертора с указанными требованиями качества сети не обеспечивается. Емкость на выходной диагонали инверторного моста также необходима для нормальной работы АИН с высокочастотной коммутацией ключей. Выходной трансформатор повышающего типа требуется потому, что в его первичной цепи установлен входной дроссель, поэтому первичное напряжение трансформатора становится меньше. Расчеты параметров трансформатора и входного дросселя должны производиться совместно.

Анализ проведенных на модели экспериментов показывает, что схема работает устойчиво и на режимах, близких к холостому ходу (при устремлении  $R_H \rightarrow \infty$ ). Во всех режимах выходное напряжение стабилизировано, его искажения незначительны, но они нарастают по мере приближения к холостому ходу, т.е. настройка элементов схемы (входной дроссель) должна производиться в режиме, близком к холостому ходу.

### Система управления однофазным АИН

Один из возможных вариантов схемы управления АИН состоит в формировании опорной синусоиды требуемой частоты 50 Гц и релейного следящего контура, обеспечивающего точное воспроизведение задающей синусоиды независимо от нагрузки. Она содержит сигнал опорной синусоиды, вход от сигнала безынерционного датчика мгновенного напряжения выходной сети, элемент сравнения этих сигналов (сумматор), релейный регулятор с петлей, ширина которой может регулироваться. Сигналы с выхода релейного элемента управляют ключевыми элементами двух диагоналей моста.

Настройка элементов системы принята следующая: амплитуда опорной синусоиды 10 В частотой 50 Гц; коэффициент датчика обратной связи  $1/(22\sqrt{2}) = 1/31$  для приведения номинального выходного напряжения к уровню опорной синусоиды; релейный элемент с шириной петли гистерезиса  $\pm 0,001$  В.

При этом следует учесть, что указанный вариант построения схемы управления ключами АИН не является единственным. Здесь применен чисто релейный регулятор для слежения за опорной синусоидой. Как следствие, частота переключения силовых транзисторов АИН непостоянна и зависит от нагрузки. Это прояв-

ляется в том, что инвертор при работе «поет», его звук слышен персоналу, вызывая негативные акустические ощущения. Выбором ширины петли гистерезиса можно ограничить верхний предел этой частоты, чтобы гарантировать динамические потери в ключах на требуемом уровне.

В другом возможном варианте используется опорная постоянная несущая частота, на которой и происходит переключение силовых транзисторов в каждый период несущей. Акустические свойства инвертора при этом способе стабильны.

### Трехфазный АИН

Модель трехфазного автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) по схеме завода «Инвертор» (г. Оренбург) и других разработчиков СБП представлена на рис. 6.

Модель содержит источник 253 В, имитирующий аккумуляторную батарею; три однотипных ячейки однофазного мостового инвертора, рассмотренного выше и содержащего по четыре IGBT-транзистора с обратными диодами, и три системы управления этими инверторами, идентичными рассмотренным ранее. Вторичные обмотки трех однофазных трансформаторов АИН объединены в звезду с нейтралью, соединенной с землей. Каждая из однофазных ячеек работает аналогично описанному выше.

Рассмотренный вариант силовой части трехфазного инвертора, состоящий из трех однофазных ячеек, соответствует распространенным техническим решениям фирм-изготовителей [2, 3]. При этом общее число транзисторных ключей трехфазного источника бесперебойного питания равно 12. Как известно, существуют схемы трехфазного двухуровневого АИН с ШИМ и шестью ключами, к трем выходным зажимам которого можно подключить трехфазный трансформатор. Подобное решение используется, например, фирмой Benning. Этот вариант в технологическом и экономическом смысле существенно превосходит первый. Однако, с точки зрения надежности, вариант с тремя ячейками однофазных инверторов может быть предпочтительнее. Но эти вопросы должны решаться проектировщиками и изготовителями.

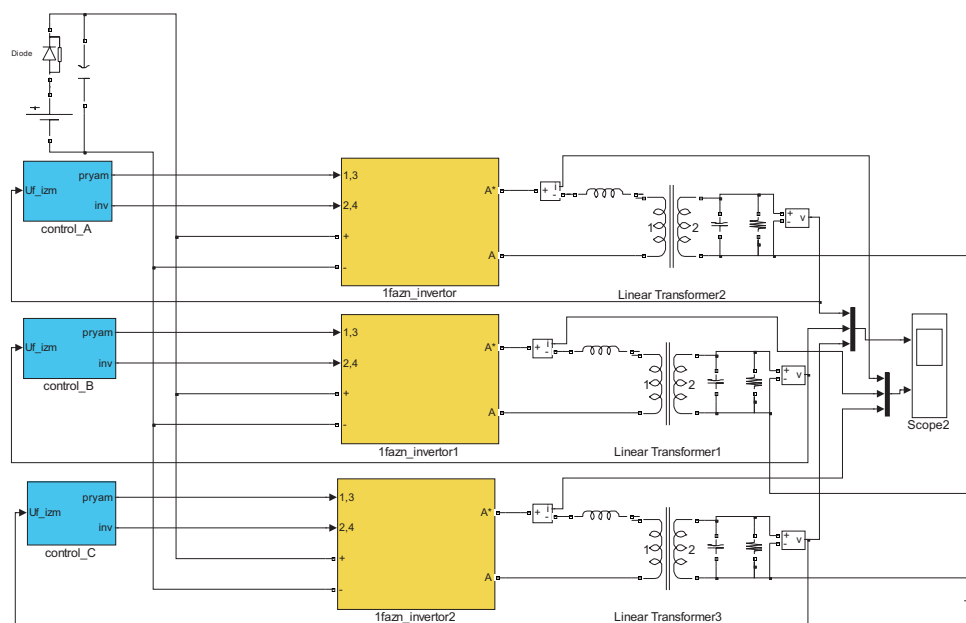


Рис. 6. Модель трехфазного АИН в MatLab



## Общая схема выпрямителя и одной ячейки АИН

В нормальных условиях при наличии первичной сети выпрямитель работает в режиме подзаряда АБ, а АИН питается от параллельно работающих управляемого выпрямителя и АБ. При этом можно рассмотреть ряд новых вопросов, представляющих практический интерес:

- пуск системы бесперебойного питания при наличии первичной сети;
- синхронизация системы управления с первичной сетью.

При отсутствии первичной сети АИН работает от АБ, и основные вопросы этого режима рассмотрены ранее. Опорная синусоида для работы системы управления может быть получена на выходе стабилизированного генератора, но его выходной сигнал может быть и не синхронизирован с сетью. Однако при восстановлении первичной сети возникает задача плавного (без динамических возмущений) перехода от автономного питания к работе параллельно с выпрямителем. Это требует разработки методики согласования в работе системы управления с сетью.

Модель основной части системы бесперебойного питания (рис. 7) содержит УВ; однофазный транзисторный АИН; выходные цепи АИН и нагрузку.

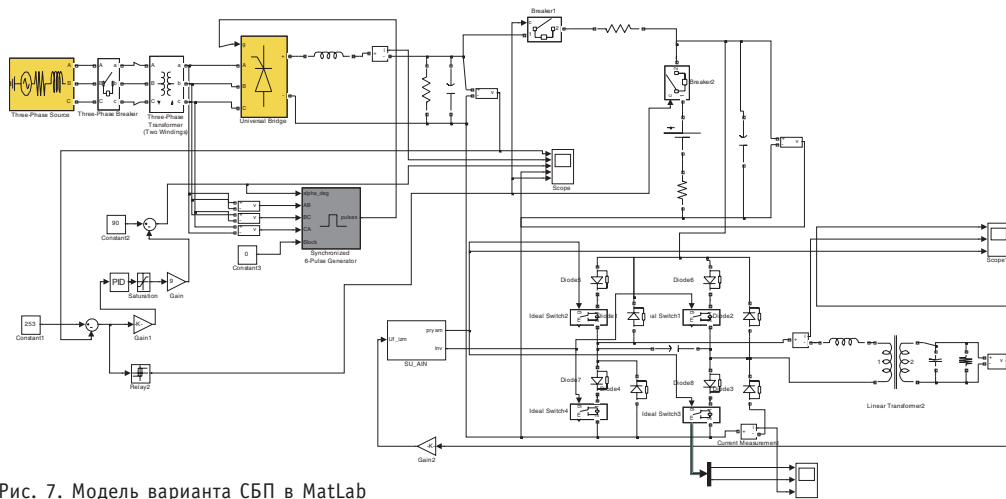


Рис. 7. Модель варианта СБП в MatLab

Рассмотрены разные варианты пуска и совместная работа управляемого выпрямителя и однофазного АИН при наличии первичной сети.

Так, к примеру, работа выпрямителя на батарею с внутренним сопротивлением (0.01 Ом) при разряженной АБ, начальном напряжении 200 В и сопротивлении нагрузки  $R_H=0.5$  Ом показана на рис. 8а. Подключение нагрузки в этом опыте осуществляется при достижении на выходе выпрямителя заданного значения выпрямленного напряжения 253 В. Процессы в силовой цепи инвертора для этого варианта показаны на рис. 8б.

Видно, что выходное напряжение нагрузки стабилизировано и сохраняет синусоидальную форму с самого начала пуска, выпрямленное напряжение имеет незначительные пульсации.

## ВЫВОДЫ

1. Полученные материалы могут быть использованы персоналом лаборатории преобразовательной техники САЭС для первоначального представления о работе систем бесперебойного питания, поступающих на АЭС по плану продления сроков службы энергоблоков.



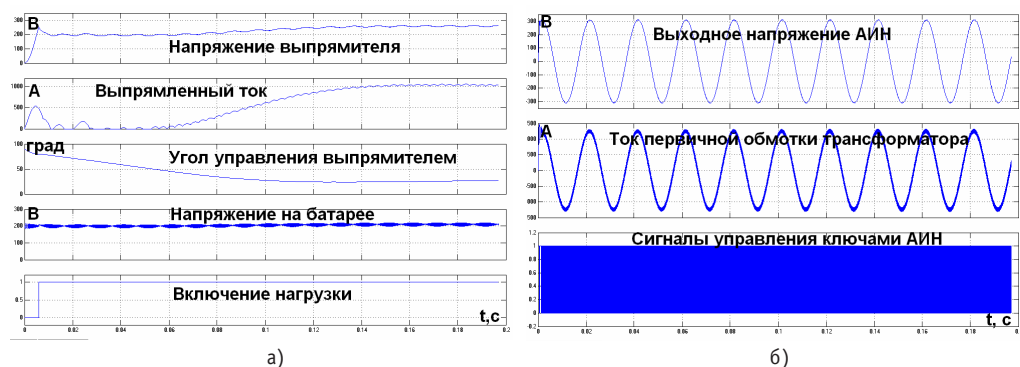


Рис. 8. Переходные процессы в совместной модели УВ и АИН для СП в MatLab

2. При помощи разработанных моделей можно оперативно проверить корректность заводских настроек регуляторов систем управления выпрямителем и инвертором, правильность выбора элементов силовой схемы, промоделировать штатные и возможные аварийные режимы еще до поставки нового оборудования. Тем самым появляется возможность выставления более квалифицированных требований фирмам-поставщикам по необходимому перечню и содержанию эксплуатационной документации.

3. Разработанные компьютерные модели дают возможность персоналу использовать методику моделирования в MatLab для создания собственных вариантов моделей и, таким образом, иметь в своем распоряжении удобный мощный тренажер, недорогие и безопасные эксперименты на котором позволяют рассматривать даже такие ситуации, которые никогда нельзя осуществить на реальном оборудовании АЭС.

### 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://gutor.info@apcc.com>, [www.gutor.com](http://www.gutor.com). Подразделение Schneider Electric. Официальный сайт Gutor. Швейцария, Берн, 2009.
3. <http://www.asu@sbp-invertor.ru>. ОАО Завод Инвертор, Оренбург, 2009.

Поступила в редакцию 5.10.2009

**УДК 621.039.56**

*Model of a Unit Power Supply under the Scheme of the Transistor Voltage-Source Inverter \ V.V. Rojkov, V.E. Aidaraliev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 8 illustrations. – References, 3 titles.*

This paper contains a complex of models of the basic converting blocks of modern systems of unit power supply of electric equipments which are delivered on the Nuclear Power Plant under plans of prolongation of service life of generating sets. Similar deliveries are often accompanied by very limited technical information on products. Represented paper urged to meet this lack in any measure. The developed complex of models allowing by computer modeling to investigate the basic modes of functioning of blocks in UPS is for this purpose intended. Results of modeling are resulted, recommendations for choice parameters of elements of the power circuit, on diagnostics and adjustment of regulators of control systems by converters – the operated rectifier and the transistor independent inverter are given.

**УДК 681.58**

*Synthesis of Automated Control System of the Complex of Fluoridation and Capture Devices of Uranium Hexafluoride Production \ S.A. Baydali, V.F. Dyadik, A.S. Jurkov, N.S. Krinitsyn; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 12 pages, 1 tables, 8 illustrations. – References, 10 titles.*

The work presents stages of synthesis of cascade two-planimetric automated control system of the complex of fluoridation and capture devices of uranium hexafluoride production. Calculation method of internal and external regulators parameter settings is developed and realized.

Computer research of regulation quality are made with different regulator combinations.

**УДК 621.039.54: 621.039.7**

*Multi-attribute Evaluation and Choice of Alternatives for the Surplus Weapons-Grade Plutonium Disposition Using Utility Function at Functional Dependences of Weight Factors \ V.V. Kosterev, Yu.V. Semenova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 12 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 10 titles.*

Multi-attribute Evaluation and Choice of Alternatives for the Surplus Weapons-Grade Plutonium Disposition Using Utility Function at Functional Dependences of Weight Factors has been made. Investigations of several versions of weighting functions were carried out. Sensitivity analysis was used to explore the robustness of the rankings relative to changes in the weights in more detail. It has been shown that using of weighting functions for the ranking of alternatives enlarges the possibilities of the method of the multi-attribute evaluation, making it possible to consider, for example, decision maker preferences for different alternatives.

**УДК 621.039.54**

*Model of Multicomponent Extraction Process in the Column \ A.D. Hrenkov, Y.A. Chursin, A.A. Denisevich; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 5 illustrations. – References, 16 titles.*

The model of multicomponent process of extraction in pulsating column is presented. Model analysis on adequacy to real apparatus was made. The received results have shown, that the presented model adequacy to the real nuclear fuel-reprocessing apparatus.

**УДК 621.039.566**

*Hydrodynamics of the Heat-Carrier and Behaviour of Impurity in Contour of Repeated Compulsory Circulation RBMK during a Stop of the Block \ V.I. Gorbakov, S.V. Ivanov, O.S. Kuganiyazov, A.I. Zababurin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 6 illustrations. – References, 4 titles.*