

Юдинцев А.Г.¹, Ткаченко А.А.¹, Ляпунов Д.Ю.^{1,2}

¹Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики ТУСУР, Томск

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ИМИТАТОРА НАГРУЗОК ДЛЯ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

В статье описана методика разработки имитатора нагрузки для наземных испытаний систем электропитания автономных объектов различного назначения с применением блока повышающих преобразователей напряжения в качестве формирующего ток нагрузки электротехнического комплекса. Рассмотрена структура силовой части и системы управления блока повышающих преобразователей. Проанализированы современные методики разработки электротехнических комплексов. Предложено учитывать допустимый разброс параметров отдельных компонентов силовых схем (резисторов, конденсаторов и дросселей) при моделировании разрабатываемых электротехнических комплексов с применением современных программных продуктов, таких как *Matlab Simulink*. Созданная методика позволяет выявлять особенности работы имитаторов нагрузок на этапе разработки с учётом разброса параметров компонентов силовых схем, настраивать регуляторы с применением имитационных моделей, рассматривать множество вариантов реализации силовых схем и систем управления электротехнического комплекса. Перечисленные преимущества позволяют значительно сократить временные и стоимостные затраты на процесс разработки имитаторов нагрузок для систем электропитания автономных объектов и настройки их регуляторов. Численные и натурные эксперименты показывают хорошую корреляцию, что даёт основания для применения разработанной методики при создании новых электротехнических комплексов различного назначения и их компонентов. Удобство сохранения результатов экспериментов в виде массивов значений переменных и доступность для разработчика электротехнических комплексов имитационных моделей в среде *Simulink* позволяет использовать созданную методику для дальнейшего анализа работы изготовленного имитатора нагрузки на этапе наземных испытаний систем электропитания автономных объектов с целью совершенствования схемотехнических решений и подстройки регуляторов.

Ключевые слова: методика разработки, электротехнический комплекс, имитатор нагрузки, наземные испытания, система электропитания, автономный объект, повышающий преобразователь напряжения, разброс параметров, регулятор, имитационная модель.

ВВЕДЕНИЕ

Для наземных испытаний систем электропитания (СЭП) автономных объектов (космических [1], подводных [2], диагностических [3]) используются специальные электротехнические комплексы, именуемые имитаторами нагрузок (ИН).

Задачи разработки структурной и принципиальной схем, проектирования СЭП, обеспечения их комплектующими, сборка устройств и последующая настройка являются полной технологической цепочкой создания ИН, которые в режиме тестовых испытаний позволяют определить перспективные направления модернизации СЭП автономных объектов, для чего результаты испытаний анализируются совместно коллективами разработчиков СЭП и ИН. В результате принимаются решения по доработке изделий с целью повышения их ключевых показателей качества, таких как надёжность, долговечность, стабильность выходной координаты (ток, напряжение, мощность), полоса пропускания. Кроме того, к ИН для автономных объектов предъявляются повышенные требования к их энергосбережению. На основании анализа известных схем ИН авторами был создан, спроектирован и реализован ИН для испытаний СЭП автономных объектов (рис. 1).

В данной статье детально рассмотрен БПП (обведён штриховой линией на рис. 1). Функциональная схема одного из множества повышающих преобразователей, входящих в структуру БПП, представлена на рис. 2.

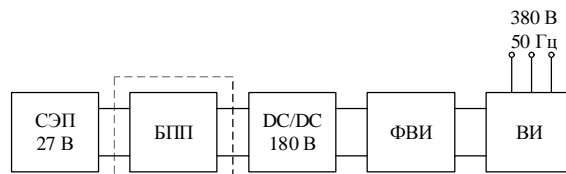


Рис. 1. Функциональная схема силового канала имитатора нагрузки силового канала:
СЭП – система электропитания; БПП – блок повышающих преобразователей, содержащий n преобразователей; DC/DC – блок преобразователей постоянного напряжения на базе автономных инверторов напряжения и выпрямителей, содержащий m преобразователей; ФВИ – фильтр ведомого инвертора; ВИ – ведомый инвертор, подключенный к мощной сети 380 В, 50 Гц

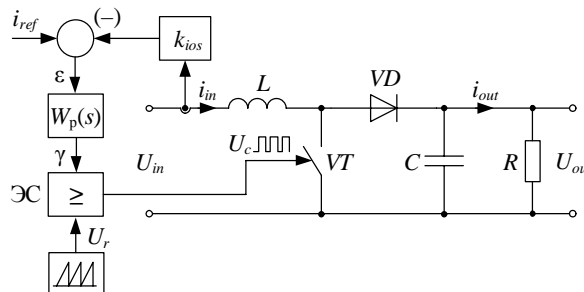


Рис. 2. Функциональная схема повышающего преобразователя: i_{ref} – ток задания; k_{ios} – коэффициент обратной связи по входному току; $W_p(s)$ – передаточная функция регулятора входного тока; ЭС – элемент сравнения; ε – ошибка по входному току; γ – сигнал управления; U_r – сигнал пилообразного напряжения; L – дроссель; C – конденсатор; R – сопротивление нагрузки; VT – транзистор; VD – диод; U_{in} – входное напряжение; U_{out} – выходное напряжение; i_{in} – входной ток; i_{out} – ток нагрузки

Отметим, что отдельный повышающий преобразователь в составе электротехнического комплекса является сложной динамической системой, что налагает определённые особенности на процесс разработки и настройки регулятора. Основные признаки сложности объектов управления перечислены в [4]. С классификацией систем в соответствии с их структурной сложностью можно познакомиться в [5], где также отмечается, что «сложность подсистем оценивается полностью независимо от системы и может отличаться от её сложности в любую сторону».

Применительно к повышающему преобразователю, сложность задачи его разработки состоит в необходимости детального математического описания силовой части для качественной настройки регуляторов и обеспечения процесса управления. Кроме того, нестационарность параметров рассматриваемого нами БПП, выражающаяся в их допустимом статистическом разбросе и дрейфе в процессе работы, также вносит свои коррективы в процесс разработки и настройки регуляторов БПП. Для выявления всех перечисленных особенностей работы электротехнического комплекса была создана предлагаемая в данной статье методика разработки ИН.

Вкратце перечислим требования к БПП ИН. Разрабатываемый БПП должен обеспечить ток нагрузки для СЭП в диапазоне от 0 до 360 А и качественно формировать форму тока (синусоида, трапеция, меандр и др.). Возможность задания формы тока нагрузки позволяет, в частности, снимать частотные характеристики СЭП, определять статические (статическая ошибка, коэффициент передачи) и динамические показатели качества (полоса пропускания по модулю и по фазе, перерегулирование, время регулирования) и обеспечивать корректную настройку регуляторов СЭП. Таким образом, от качества настройки регуляторов ИН в конечном счёте зависит качество наземных испытаний СЭП.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В настоящее время существует множество методик разработки электротехнических комплексов. Ниже приводятся некоторые из них, принятые авторами во внимание при создании методики разработки имитаторов нагрузки.

В первую очередь выделим подход, вовлекающий понятие систем автоматизированного проектирования (САПР). Эти системы содержат программные и аппаратные средства, назначением которых является автоматизация рутинной части работы конструктора и проектировщика. Для функционирования САПР создаются соответствующие пакеты прикладных программ по расчёту входящих в электротехнический комплекс устройств, их компоновке и построению графиков и изображений. В [6] отмечается важность математической базы, на которой построена та или иная САПР, подробно описывается используемый математический аппарат и основы графического представления информации.

С целью настройки СЭП телеуправляемого необитаемого подводного аппарата в [7] предлагается применение средств когнитивной графики, что позволяет

снизить временные и стоимостные затраты на разработку, а также повысить качество настройки регуляторов. Преимуществом рассматриваемого в этой статье подхода является возможность наглядного визуального отображения показателей качества работы СЭП в процессе настройки её регуляторов.

Важной составляющей процесса проектирования СЭП автономных объектов является взаимодействие коллективов, занимающихся различными сторонами процесса, начиная с математического моделирования подсистем СЭП, заканчивая составлением перечней покупных изделий, закупкой компонентов, сборкой и настройкой ИН СЭП автономных объектов.

В [8] предложен трёхмерный параллельный инжиниринг (3DCE – *three dimensional concurrent engineering*) как метод обеспечения цепочки поставок компонентов для новых продуктов в процессе их разработки. Отмечается важность и настоятельная необходимость применения информации о предыдущих инновационных разработках в процессе создания новых. При этом на каждой стадии учитываются требования к продукту со стороны потребителя и устанавливаются партнёрские отношения с поставщиками.

В [9] отмечается важность для процесса разработки и проектирования устройств силовой электроники ERP-систем, представленных на российском рынке (Лощман (*PLM + Вертикаль*), Спрут-ТП, SAP, Oracle EBS, Галактика и 1С УПП). Предлагается методика создания электронных устройств на базе наработанных алгоритмов автоматизации процесса комплектования, реализованных в программе Excel. Описанный в этой статье подход позволяет в процессе создания устройства силовой электроники загружать номенклатуру; отлаживать как взаимодействие перечней элементов и спецификаций, так и механизм разузлования устройств по спецификациям; инициировать процесс размещения на склад и отдел комплектации. В конечном счёте, это позволяет значительно ускорить процесс комплектования для производства, уменьшить финансовые потери и снизить риски, связанные с невыполнением сроков. Более того, используемые алгоритмы обеспечивают всесторонний анализ и контроль состояния производственных процессов и передвижения материальных ценностей в процессе разработки и изготовления ИН.

В настоящее время стало возможно объединять САПР для повышения эффективности разработки электронных устройств. Так, в [10] предлагается методика так называемого междисциплинарного проектирования (*cross-cutting design (CCD)*), обеспечивающего коллективную непрерывную работу над одним проектом с использованием САПР различного функционального назначения. При этом для разрабатываемого проекта одновременно разными специалистами производится оценка электрических и тепловых процессов, разрабатывается печатная плата, отображается 3D-модель готового устройства, что значительно снижает затраты на проектирование, изготовление и испытание прибора.

Для качественной разработки ИН СЭП необходима методика, которая позволит использовать современные программные средства для качественной настройки регуляторов ИН СЭП, выявления особенностей режимов работы – динамических и статических.

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ИМИТАТОРА НАГРУЗКИ

Принимая во внимание вышеперечисленные особенности существующих методик и подходов к разработке устройств, создана методика разработки ИН для СЭП автономных объектов, позволяющая значительно сократить временные и стоимостные затраты на процесс разработки и настройки ИН с применением среды Matlab Simulink для конструирования математических и имитационных моделей и проведения над ними ряда виртуальных экспериментов.

Пакет моделирования Matlab Simulink обладает значительными преимуществами при разработке СЭП, так как содержит готовые элементы электрических цепей с возможностью их взаимного соединения в файле Simulink [11]. Кроме того, рассматриваемая среда позволяет реализовывать силовые блоки и элементы систем управления в программном виде на языках matlab, C и C++ [12].

Таким образом, представляется возможным в процессе разработки ИН для СЭП автономных объектов задавать допустимый разброс параметров отдельных компонентов (сопротивлений, дросселей, конденсаторов), применяя характерные для них распределения вероятностей, что позволит исследовать систему на робастную устойчивость и проверить работу регуляторов в этих условиях. Отметим, что блок повышающих преобразователей в составе имитатора нагрузки является основным функциональным элементом, формирующим ток нагрузки.

В [13] подробно рассмотрены особенности моделирования одного из вариантов повышающего преобразователя в среде Matlab Simulink. В результате подтверждена работоспособность системы управления преобразователем в различных режимах работы. Авторами рассматриваемой статьи были выявлены особенности динамических процессов в различных режимах работы комплекса, при сбросе и набросе нагрузки. Адекватность модели была подтверждена на реальном объекте. В связи с этим результаты исследований, приведённые в [13], были применены при создании методики разработки ИН.

Созданная авторами методика разработки ИН для наземных испытаний СЭП автономных объектов на базе БПП выражена следующими пунктами:

1. Расчёт параметров электрической принципиальной схемы БПП в зависимости от требуемой амплитуды пульсаций входного тока, его величины.
2. Построение имитационной модели силовой части БПП в среде Matlab Simulink, её запуск в разомкнутой системе.
3. Настройка контуров регулирования входного тока каждого повышающего преобразователя ИН и внешнего контура суммарного входного тока.
4. Построение имитационной модели замкнутой системы БПП, её запуск.
5. Сравнение показателей качества переходных процессов и статических режимов с требуемыми (перерегулирование, время переходного процесса, статическая ошибка и др.), коррекция параметров регуляторов, если требуется.
6. Учёт разброса параметров элементов имитационной модели силовой схемы. Повторение процедур, приведённых в пункте 5.

7. Создание перечня покупных изделий БПП.

8. Анализ статических и динамических характеристик модели специалистами из различных проблемных областей (силовая электроника, теплотехника, системы автоматического управления), задействованных в процессе разработки ИН. Коррекция параметров устройства, если требуется.

9. Сборка и монтаж БПП.

10. Испытание ИН. Сопоставление динамических характеристик, полученных при моделировании и испытаниях. Коррекция параметров регуляторов, если требуется.

Предложенная методика позволит в значительной степени обобщить подход к проектированию как повышающих преобразователей в частности, так и основанных на них имитаторов нагрузки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе разработки ИН в среде *Matlab Simulink* была создана имитационная модель, фрагмент которой приведён на **рис. 3**. Фрагмент включает силовую часть повышающего преобразователя ПП1 (обведён штриховой линией) и систему управления (сверху). Также показаны два повышающих преобразователя в виде блоков ПП2 и ПП3. Рассматриваемый ИН состоит из 20 повышающих преобразователей, подключённых параллельно.

Выбор количества преобразователей определяется максимальным в диапазоне регулирования значением нагрузочного тока (360 А) во входной цепи ИН, который, в свою очередь, определяется токонесущей способностью применяемых полевых транзисторов VT1...VT20 в составе каждого повышающего преобразователя. То есть формируемый имитатором нагрузки ток зависит от применяемой элементной базы силовых полупроводниковых ключей. Таким образом, среднее значение тока каждого полевого транзистора ИН составляет $360/20=18$ А.

Преимуществом рассматриваемого технического решения является значительное снижение амплитуды пульсаций входного тока за счёт временного сдвига пилообразного сигнала временной развёртки на 1 мкс для управления каждым последующим ключом БПП относительно предыдущего. Так как частота коммутаций каждого ключа составляет 50 кГц (период равен 20 мкс), а использование большей частоты приводит к повышенным потерям на переключение, то использование указанного временного сдвига при формировании сигнала управления приводит к эквивалентной частоте коммутаций 1 МГц, что является причиной значительного уменьшения коэффициента пульсаций, составляющего сотые доли процента в установившемся режиме.

На **рис. 3** сверху приведена система управления, содержащая внутренний контур тока одного преобразователя и внешний контур суммарного тока ИН. Каждый преобразователь имеет обратную связь по входному току с ПИ-регулятором, настроенным в соответствии с желаемыми показателями качества переходного процесса. Внешний контур обратной связи по суммарному входному току содержит регулятор, настроенный с учётом всех внутренних контуров каждого повышающего преобразователя на этапе разработки.

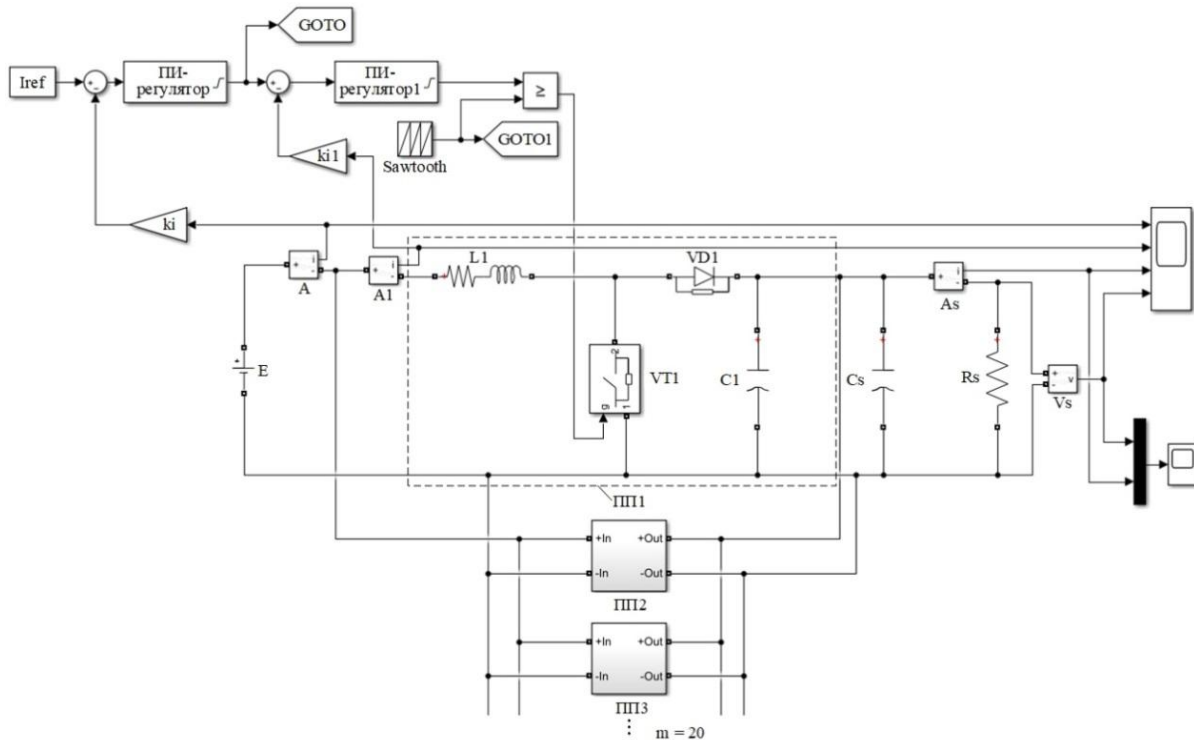


Рис. 3. Фрагмент имитационной модели имитатора нагрузки системы электропитания автономного объекта: *Iref* – задание тока на входе блока повышающих преобразователей; ПИ-регулятор и ПИ-регулятор1 – пропорционально-интегральные регуляторы входного тока БПП и первого повышающего преобразователя соответственно; *ki* и *ki1* – коэффициенты обратной связи по входному току БПП и току первого преобразователя соответственно; *GOTO* и *GOTO1* – блоки, передающие в систему управления сигнал с выхода регулятора входного тока БПП и сигнал пилообразного задающего напряжения соответственно; *A*, *A1* и *As* – амперметры; *Vs* – вольтметр; ПП1, ПП2, ПП3, ... – повышающие преобразователи БПП, их количество $m = 20$; *E* – выходное напряжение испытываемой системы электропитания; *L1*, *C1*, *Cs*, *Rs* – параметры силовой цепи: индуктивность входного дросселя, ёмкость одного повышающего преобразователя, выходная ёмкость БПП, сопротивление нагрузки соответственно; *VT1* – полевой транзистор; *VD1* – диод; справа расположены два осциллографа

При моделировании учитываются возможные отклонения параметров компонентов ИН путём использования функции *rand*, реализующей нормальное распределение. Допустимые разбросы параметров задаются исходя из паспортных данных резисторов ($\Delta R = 5\%$), конденсаторов ($\Delta C = 15\%$) и дросселей ($\Delta L = 10\%$). Все функции и параметры задаются в окне свойств модели (*Model properties* → *Callbacks* → *>InitFcn**).

Результаты численного эксперимента ИН в виде графика входного тока одного повышающего преобразователя от времени $i_{in}(t)$ приведены на **рис. 4**. Полученный график имеет максимум во время $t_{max} = 0,5$ мс, что связано с зарядкой выходной ёмкости повышающего преобразователя. Отметим, что в макетном образце ИН подобного скачка тока не наблюдается, так как на этапе проектирования синтезируется алгоритм плавного запуска, заключающийся в плавном нарастании сигнала задания на суммарный ток, формируемый ИН, с интенсивностью, вычисленной на основании **рис. 3**.

При этом предполагается, что сигнал задания на суммарный ток нагрузки должен линейно увеличиваться от 0 до номинального значения за время, большее, чем 2,5 мс.

После получения результатов численных экспериментов проводятся испытания непосредственно на

макете ИН. При этом параметры регулятора определяются исходя из разработанной имитационной модели, что значительно упрощает процедуру его настройки. Данные вышеперечисленных экспериментов сравниваются и корректируются с учётом особенностей разброса параметров компонентов макетного образца. Таким образом, достигается значительная экономия временных и стоимостных затрат на разработку и настройку ИН.

Цикл нагружения ИН приведён на **рис. 5**.

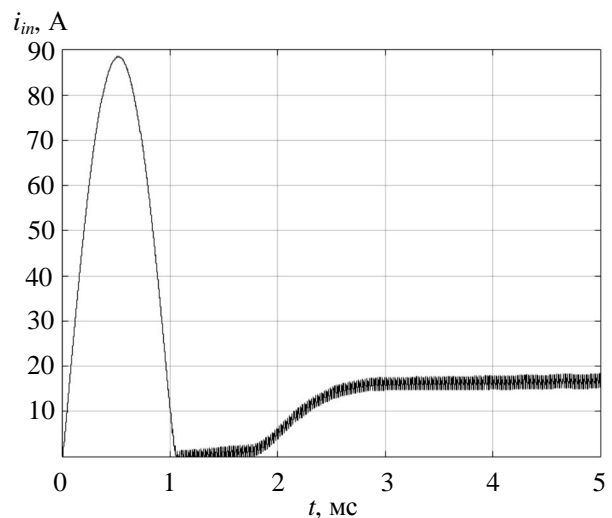


Рис. 4. Зависимость входного тока от времени

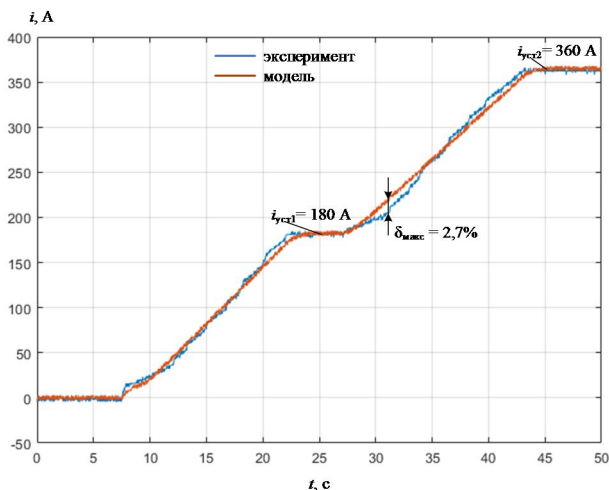


Рис. 5. Цикл нагружения имитатора нагрузки

В момент времени 7,5 с на вход системы подаётся сигнал задания, соответствующий 180 А. Далее в момент времени 27,5 с сигнал задания удваивается, что соответствует заданию на входной ток 360 А. Как видно из рис. 5, величина динамической ошибки, характеризующая максимальное отклонение экспериментальных исследований от результатов численного моделирования, составляет $\delta_{\max} = 2,7\%$. В статических же режимах величина ошибки пренебрежимо мала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика разработки ИН для СЭП автономных объектов позволяет исследовать электротехнические комплексы с применением современных средств моделирования с учётом разброса параметров компонентов. На основе полученной имитационной модели настроены регуляторы модуля повышающего преобразователя ИН и проанализированы графики переходных процессов. БПП обеспечивает ток нагрузки СЭП в диапазоне от 0 до 360 А, что удовлетворяет предъявляемым требованиям. Использование разработанной методики позволяет значительно сократить временные и стоимостные затраты на настройку регуляторов, так как настройка происходит на этапе разработки. Отметим, что в процессе настройки возможно рассмотрение нескольких вариантов регуляторов, настроенных на один из оптимумов – линейный, технический, симметричный либо иной в зависимости от требуемых показателей качества. В рассматриваемом случае был применён вариант настройки на линейный оптимум. Применение программного пакета *Matlab Simulink* позволило не только производить схемотехническое описание, но и учитывать разброс параметров компонентов, а также их изменение в процессе работы электротехнического комплекса.

Результаты численных экспериментов сохраняются в виде массивов данных, организованных в компактные файлы. Высокая скорость моделирования позволяет также отказаться от сохранения данных, так как доступность файла *Simulink* с моделью преобразователя подразумевает доступность для разработчика всего множества вариантов параметров элементов ИН.

Численные и натурные эксперименты показали хорошую корреляцию. Ошибка по выходному напряжению БПП не превышает 3%. Ошибка по суммарному

току преобразователя составляет не больше 2,7%. Таким образом, разработанная методика позволяет значительно сократить временные и стоимостные затраты как на проектирование, так и на экспериментальные исследования имитаторов нагрузок, выявляя особенности работы электротехнического комплекса на стадии разработки.

Дальнейшие исследования по совершенствованию методики разработки имитатора нагрузки будут направлены на выявление особенностей электромагнитных процессов в комплексе и учёт взаимного влияния всех компонентов силового канала ИН, приведённых на рис. 1.

Статья подготовлена в рамках выполнения работы Г/Б 2/20/1 «Изучение фундаментальных проблем создания и теоретические исследования систем ресурсосберегающей интеллектуальной силовой электроники с использованием технологий интернет вещей и радиофотоники на основе компонентной базы собственной разработки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышёв, Ш.Н. Ислаев. Новосибирск: ВО «Наука», Сибирская издательская фирма, 1994. 318 с.
2. Система электропитания высоковольтного аппарата с высоковольтной передачей энергии постоянного тока по кабель-тросу / В.М. Рулевский, В.А. Чех, В.Г. Букреев, Р.В. Мещеряков // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2018. № 1 (195). С. 155-167.
3. Поезжаева Е.В., Горетова В.А. Модернизация внутритрубной диагностической системы // Молодой учёный. 2019. № 1 (239). С. 43-46.
4. Расстригин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. М.: Сов. радио, 1980. 232 с.
5. Кохановский В.А., Сергеева М.Х., Комахидзе В.Г. Оценка сложности систем // Вестник Донского государственного технического университета. 2012. № 4 (65). С. 22–26.
6. Шенен П., Коснар М., Гардан И. Математика и САПР: в 2-х кн. Кн. 1. М.: Мир, 1988. 204 с.
7. Моделирование системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с использованием средств когнитивной графики / Д.Ю. Ляпунов, А.Е. Янковская, В.М. Рулевский, А.А. Правикова // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'17», 2–9 сентября 2017 г., Дивноморское, Россия. Таганрог: Изд-во Ступина С.А., 2017. Т. 1. С. 265–271.
8. Bakås O., Magerøy K., Sjøbakk B., Thomassen M.K. Performing supply chain design in three-dimensional concurrent engineering: Requirements and challenges // IFIP Advances in Information and Communication Technology: Proc. of the International Conference. September 7–9, 2015, Tokyo, Japan. Springer Nature, 2015, pp. 549-557.
9. Пучков А.Н., Юдинцев А.Г. Внедрение ERP-систем в производственные и финансовые процессы для увеличения уровня автоматизации управления // Научная сессия ТУСУР–2019: материалы Международной научно-технической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 22–24 мая 2019 г., Томск, Россия. Томск: В-Спектр, 2019. Ч. 2. С. 146–149.
10. Korolev P.S., Novikov K.V., Polesskiy S.N., Korotkova G.K. The Implementation of the Cross-cutting Design of Electronic Communication Modules Using National Instruments Technologies // Proc. of International Siberian Confer-

- ence on Control and Communications SIBCON, April 18–20, 2019, Tomsk, Russia. IEEE: 2019. Paper № 8729585.
11. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink. СПб.: Лань, 2018. 443 с.

12. Shaffer R. Fundamentals of Power Electronics with Matlab. Boston, Massachusetts, Charles River Media, 2007, 384 p.
13. Володин Е.В., Осипов О.И. Экспериментальное исследование повышающего DC-DC-преобразователя // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №3(44). С. 47-52.

Поступила в редакцию 31 января 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

METHODOLOGY OF LOAD SIMULATOR DESIGN FOR GROUND TESTING OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF AUTONOMOUS OBJECTS

Anton G. Yudintsev

D.Sc. (Engineering), Director, the Research Institute of Automation and Electromechanics of TUSUR (Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics), Tomsk, Russia. E-mail: yag@niiem.tomsk.ru.

Alexander A. Tkachenko

D.Sc. (Engineering), Director, Head of the Information Technology Department of the Research Institute of Automation and Electromechanics of TUSUR (Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics), Tomsk, Russia. E-mail: aem@tusur.ru.

Danil Yu. Lyapunov

D.Sc. (Engineering), Senior Research Associate, the Research Institute of Automation and Electromechanics of TUSUR (Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics), Associate Professor of the Department of Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering of the National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. E-mail: lyapdy@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9326-3595>

The paper deals with the methodology for the design of load simulators for ground testing of power supply systems for various autonomous objects using a boost converter as a current wave-forming electrical complex. The structure of the power unit and control system of the boost converter block is considered. The modern methodologies of design of electrical complexes are analyzed. It is suggested to take into account the allowable variation in the parameters of power electronic components (resistors, capacitors and inductors) when modeling the complexes under development using modern software such as Matlab Simulink. The created methodology makes it possible to identify the peculiarities of the load simulator operation during the development stage, to take into account the variation of the parameters of the power circuit components, to adjust the regulators using simulation models, to analyze a set of design options for power circuits and control systems of the electrical complex. This significantly reduces the time and cost of the simulator design process as well as controller tuning. Numerical and laboratory-scale experiments showed good correlation, which gives grounds for applying the developed methodology to create new electrical complexes for various purposes and their components. The convenience of saving the results of experiments in the form of arrays of variables and the availability of simulation models of electrical complexes in Matlab Simulink for the developer allows application of the created methodology for further analysis of the load simulator operation at the stage of ground testing of power supply systems for autonomous objects in order to improve circuitry solutions and to additionally adjust the regulators if necessary.

Keywords: methodology of design, electrical complex, load simulator, ground tests, power supply system, autonomous object, boost converter, parameter variation, controller, simulation model.

REFERENCES

1. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshev A.I., Islyayev S.N. *Sistemy electropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Power Supplies of Space Vehicles]. Novosibirsk, VO Nauka, Siberian Publishing Company, 1994. 318 p. (In Russian)

2. Rulevskiy V.M., Chekh V.A., Bukreev V.G., Mescheryakov R.V. Power Supply System for Deep Sea Underwater Vehicle with HVDC Power Transmission via Rope-cable. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tehnicheskiye nauki* [Bulletin of South Federal University. Technical Sciences], 2018, no. 1 (195), pp. 155–167. (In Russian)
3. Poezhaeva E.V., Goretova V.A. Modernization of Pipeline Diagnostic System. *Molodoy ucheniy* [Young Scientist], 2019, no. 1 (239), pp. 43–46. (In Russian)
4. Rasstrigin L.A. *Sovremennyye principy upravleniya slozhnyimi obyektami* [Modern Principles for Complex Objects Control]. Moscow, Soviet Radio, 1980, 232 p. (In Russian)
5. Kohanovskiy V.A., Sergeeva M.H., Komahidze V.G. Assessment of System Complexity. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Don State Technical University], 2012, no. 4 (65), pp. 22–26. (In Russian)
6. Chenin P, Cosnard M, Gardan Y. *Matematika i SAPR* [Mathematics and CAD]. Moscow, Mir; 1988, 204 p. (In Russian)
7. Lyapunov D.Y., Yankovskaya A.E., Rulevskiy V.M., Pravikova A.A. Power Supply System Modeling for Remotely Operated Unmanned Underwater Vehicle Using Cognitive Graphic Tools. *Trudy kongressa po intellektualnym sistemam i informatsionnym tekhnologiyam «IS&IT'17»* [Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies “IS&IT’17”] Divnomorskoye, Russia, 2017, September 2–9, Taganrog, Stupin Publishing House; 2017, vol. 1, pp. 265–271. (In Russian)
8. Bakås O., Magerøy K., Sjøbakk B., Thomassen M.K. Performing supply chain design in three-dimensional concurrent engineering: Requirements and challenges. *IFIP Advances in Information and Communication Technology: Proc. of the International Conference. September 7–9, 2015, Tokyo, Japan*. Springer Nature, 2015, pp. 549–557.
9. Puchkov A.N., Yudintsev A.G. Implementing ERP-systems in Production and Financial Processes for Control Automation Level Improvement. *Nauchnaya sessiya TUSUR-2019: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh* [Scientific Session TUSUR-2019: Proceedings of International Scien-

- tific and Technical Conference], Tomsk, Russia, 2019, May 22–24, Tomsk, V–Spectr, 2019, pp. 146–149. (In Russian)
10. Korolev P.S., Novikov K.V., Polesskiy S.N., Korotkova G.K. The Implementation of the Cross-cutting Design of Electronic Communication Modules Using National Instruments Technologies. Proc. of International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON, April 18–20, 2019, Tomsk, Russia. IEEE: 2019. Paper № 8729585.
 11. German-Galkin S.G. *Virtualnye laboratorii poluprovodnikovyh sistem v srede Matlab-Simulink* [Virtual Semiconductor System Labs in Matlab-Simulink]. St. Petersburg, Lan, 2018, 443 p. (In Russian)
 12. Shaffer R. *Fundamentals of Power Electronics with Matlab*. Boston, Massachusetts, Charles River Media, 2007, 384 p.
 13. Volodin E.V., Osipov O.I. Experimental Research of Stepup DC-DC Converter. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 47-52. (In Russian)
-
- Юдинцев А.Г., Ткаченко А.А., Ляпунов Д.Ю. Методика разработки имитатора нагрузок для наземных испытаний систем электропитания автономных объектов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 1(46). С. 60-66. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-60-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-60-66)
- Yudintsev A.G., Tkachenko A.A., Lyapunov D.Yu. Methodology of Load Simulator Design for Ground Testing of Power Supply Systems of Autonomous Objects. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 60-66. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-60-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-60-66)
-