

УДК 621.317

О.С. Хватов<sup>1</sup>, А.Б. Дарьенков<sup>2</sup>, Д.С. Кобяков<sup>1</sup>, Н.И. Кшталтный<sup>1</sup>, М.Е. Юрлов<sup>1</sup>**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ  
ВРАЩЕНИЯ С БУФЕРНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ**Волжский государственный университет водного транспорта<sup>1</sup>  
Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Представлена математическая модель дизель-генератора переменной частоты вращения для исследования динамических режимов работы. Рассмотрены варианты топологий силовой структуры дизель-генератора переменной частоты вращения, предусмотрено использование в составе оборудования буферного накопителя энергии как необходимого элемента генераторного комплекса для обеспечения требуемой стабилизации параметров электроэнергии в режимах коммутации «пиковых» нагрузок.

*Ключевые слова:* энергоэффективность автономных электростанций, дизель-генераторная установка переменной частоты вращения, буферный накопитель энергии, моделирование динамических режимов в *MatLab/Simulink*.

**Введение**

В настоящее время работы по исследованию и созданию дизель-генератора переменной частоты вращения (ДГПЧВ) активно ведутся во многих странах, в том числе, в России. Актуальность данного направления обусловлена общей мировой тенденцией малой энергетики, направленной на повышение как эффективности использования углеводородного топлива, так и экологичности технологии производства электроэнергии. В данной области исследований известны работы фирм Fubag, Honda, Hyundai, Курог, АВВ и др. Особенности топологии силовой схемы ДГПЧВ рассмотрены в работах [1, 2]. Параллельно с созданием новых ДГПЧВ целесообразно уделять внимание и модернизации классических дизель-генераторов (ДГ) с целью перевода их работы в энергоэффективный режим при регулируемой частоте вращения. Однако данной теме посвящено относительно небольшое количество научных работ, что сдерживает исследования и разработку энергоэффективных систем электропитания на основе ДГПЧВ.

На этапе проектирования ДГПЧВ возникает комплекс задач, который связан как с выбором мощности и типом исполнения элементов силового оборудования, так и с определением структуры и последующим синтезом элементов системы автоматического регулирования. Решение указанных задач невозможно без исследования, в том числе, динамических режимов работы ДГПЧВ.

Основным устройством, обеспечивающим стабилизацию параметров генерируемой электроэнергии ДГПЧВ, является полупроводниковый преобразователь, схемотехническое исполнение которого зависит от наличия трансформатора в составе оборудования генераторного комплекса. Рассмотрим варианты структур построения ДГПЧВ, которые представлены на рис. 1 и рис. 2: СГ – синхронный генератор, Т – трансформатор, ВЧТ – высокочастотный трансформатор, В – выпрямитель, АВ – активный выпрямитель, ШИП – широтно-импульсный преобразователь, И – инвертор, Ф1, Ф2 – фильтры, Н – нагрузка. Данные структуры разделены на две группы – трансформаторные (рис. 1) и безтрансформаторные (рис. 2).

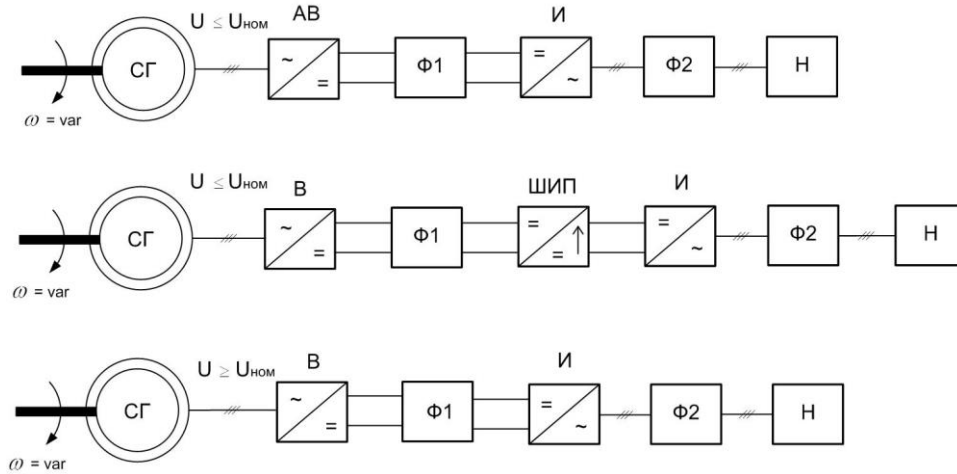


Рис. 1. Структурные схемы трансформаторных ДГПЧВ

Трансформаторные структуры по исполнению могут быть с обычным либо высокочастотным трансформатором. Использование высокочастотного трансформатора существенно снижает его массогабаритные показатели, однако усложняет структуру преобразовательной части ДГПЧВ, которая должна иметь два выпрямительных и два инверторных блока. Безтрансформаторные структуры ДГПЧВ – это системы с активным выпрямителем, либо с широтно-импульсным преобразователем повышающего типа, т.е. с устройствами, которые функционально, как и трансформатор, обеспечивают поддержание требуемого уровня напряжения. К безтрансформаторным также следует отнести ДГПЧВ с генераторами специального исполнения, имеющими повышенное номинальное напряжение на статоре.

Несмотря на то, что по массогабаритным показателям вариант ДГПЧВ со специальным генератором имеет преимущество, в статье в качестве объекта исследования выбран трансформаторный вариант ДГПЧВ с обычным генератором. Это связано, в том числе, с возможностью и целесообразностью модернизации классических ДГ постоянной частоты вращения и переводом их в энергоэффективный режим при регулируемой частоте вращения. Характеристики синхронного генератора, работающего в составе ДГПЧВ, рассмотрены в работах [3, 4].

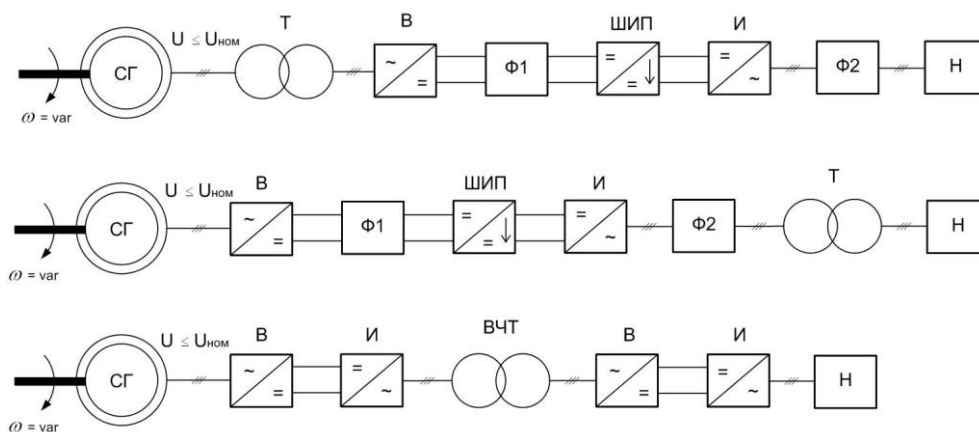


Рис. 2. Структурные схемы безтрансформаторных ДГПЧВ

В работах отечественных и зарубежных авторов [5, 6] показано, что для повышения эксплуатационных показателей генераторных комплексов на основе ДГПЧВ в его состав должен входить буферный накопитель энергии (БНЭ) (аккумуляторная батарея, суперконденсатор и т.п.), который на временных интервалах «пиковых» нагрузок способен поддер-

жать энергетический баланс между генераторным комплексом и нагрузкой, обеспечивая тем самым требуемое качество параметров генерируемой электроэнергии. При этом работа ДППЧВ осуществляется на энергоэффективных скоростных режимах (пониженная частота вращения), соответствующих оптимальному удельному расходу углеводородного топлива.

### Методы и материалы

Анализ научных работ подтверждает, что существует определенный пробел в исследовании именно динамических режимов работы ДППЧВ, к которым следует отнести, в первую очередь, режимы коммутации нагрузки. Рассмотрим структурную схему дизель-генераторной установки переменной частоты вращения (рис. 3), которая состоит из следующих элементов: Д – дизельный ДВС, СГ – синхронный генератор, СВ – система возбуждения генератора, ТР – повышающий трансформатор, В – неуправляемый выпрямитель, Ф1 – ёмкостной фильтр, Ф2 – LC фильтр, ШИП – широтно-импульсный преобразователь, БНЭ – буферный накопитель энергии, И – инвертор напряжения, Н – нагрузка.

Подобная трансформаторная топология построения силовой схемы ДППЧВ рассмотрена в работах [7-9]. На основе структурной схемы (рис. 3) в компьютерной среде MathLab разработана математическая имитационная модель ДППЧВ с БНЭ (рис. 6). С помощью данной модели показана возможность в режиме «пиковых» нагрузок и работе ДВС на энергоэффективных скоростных режимах (пониженные частоты вращения) стабилизировать величину напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты средствами БНЭ.

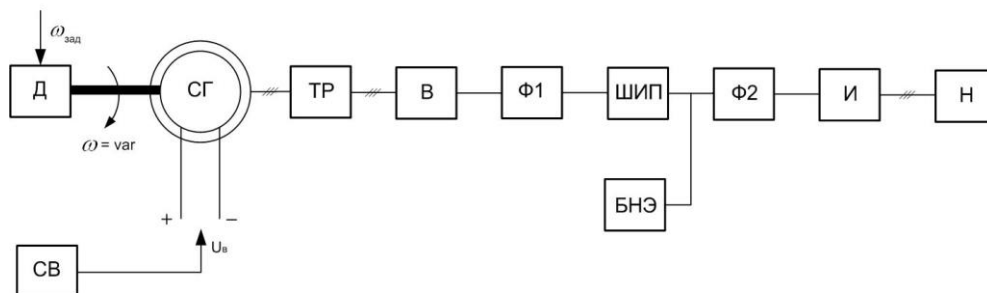


Рис. 3. Структурная схема ДППЧВ с БНЭ

В модели (рис. 4) ШИП имеется два автоматических контура регулирования: внутренний – по току и внешний – по напряжению. Структурная схема системы автоматического регулирования (САР) понижающего ШИП в составе ДППЧВ приведена на рис. 4.

Значения рассчитанных коэффициентов корректировались с помощью возможностей автоматической настройки блоков PID controller в расширении Simulink Control Design Toolbox. В Simulink Control Design используется патентованный метод настройки коэффициентов ПИД-регулятора, основанный на обратной связи с рабочими характеристиками, которые задаются пользователем. Настройка может производиться по переходной характеристике или логарифмической частотной характеристике разомкнутой системы. В качестве модели синхронной машины использовался стандартный блок «Synchronous Machine Pu Standard», в котором предусмотрен учет эффекта магнитного насыщения стали. Технические характеристики синхронного генератора приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Параметры синхронного генератора

$f$ , Гц	$U_{СГ}$ , В	$S$ , кВА	$n$ , об/мин	$R_S$ , о.е.	$X_d$ , о.е.	$X_q$ , о.е.	$J$ , кг·м <sup>2</sup>	$P_n$
50	400	31,3	1500	0,042	1,56	0,78	0,087	2

Частоту коммутации в ШИП выбираем равной 2500 Гц, а частоту модуляции в АИН – 5000 Гц. Инвертор обеспечивает генерирование практически синусоидального напряжения с помощью блока шестисекторной векторной ШИМ. Необходимый запас по напряжению в схеме обеспечивается повышающим трансформатором. Напряжение на входе ШИП составляет 900 В. Система регулирования ШИП стабилизирует его выходное напряжение на уровне 600 В. Для имитации БНЭ при исследовании динамических режимов использовалась модель никель-металлгидридного аккумулятора, характеристики разряда которого представлены на рис. 5.

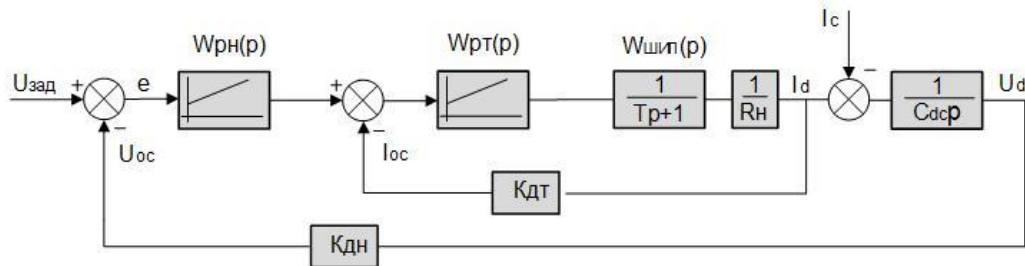


Рис. 4. Структурная схема системы автоматического управления понижающего ШИП

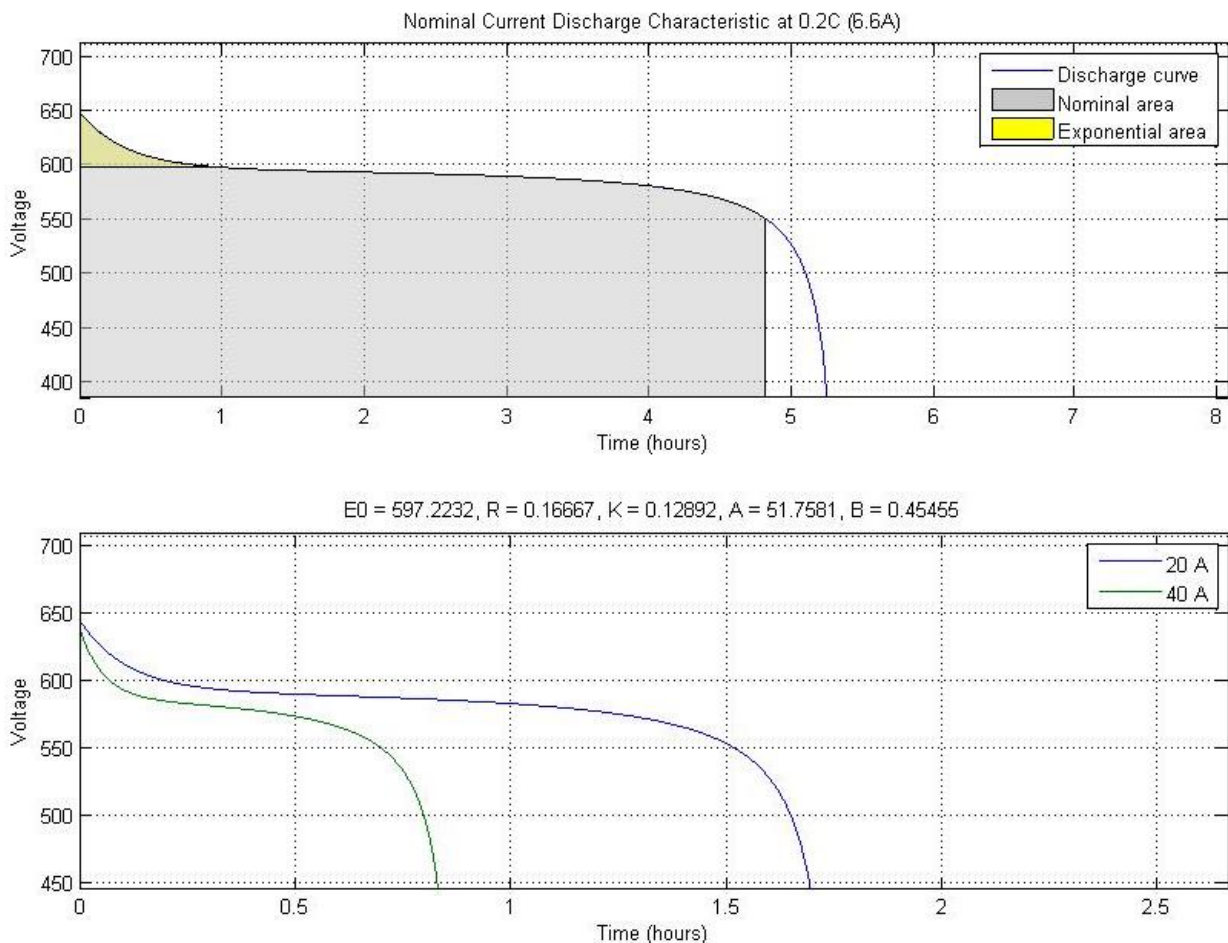


Рис. 5. Характеристики разряда никель-металлгидридного аккумулятора

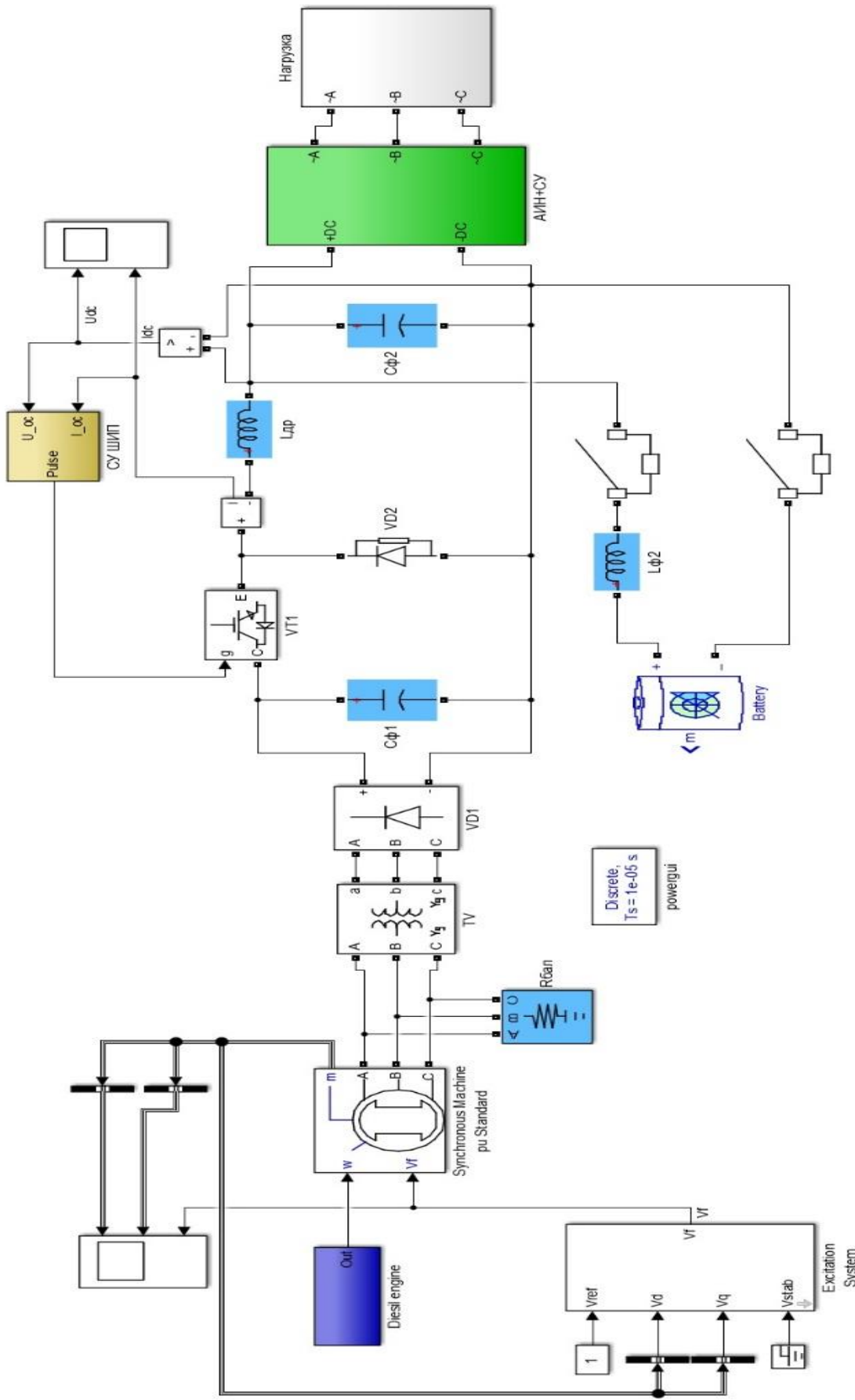


Рис. 6. Имитационная модель ДПЧВ с БНЭ

### Результаты и обсуждение

Ниже приведены графики переходных процессов в звене постоянного тока рассматриваемой модели. Алгоритм моделирования состоит из следующих этапов. В начальный момент времени ДППЧВ работает на номинальных оборотах ДВС с активной нагрузкой равной 15 кВт. В момент времени 0,7 с происходит увеличение нагрузки до 23 кВт. Далее на 1,3 с происходит увеличение доли реактивной составляющей нагрузки (уменьшение  $\cos\varphi$  нагрузки на 15%). Переходный процесс тока дросселя ШИП показан на рис. 7. Графики мгновенного и действующего значений фазного выходного напряжения ДППЧВ показаны на рис. 8.

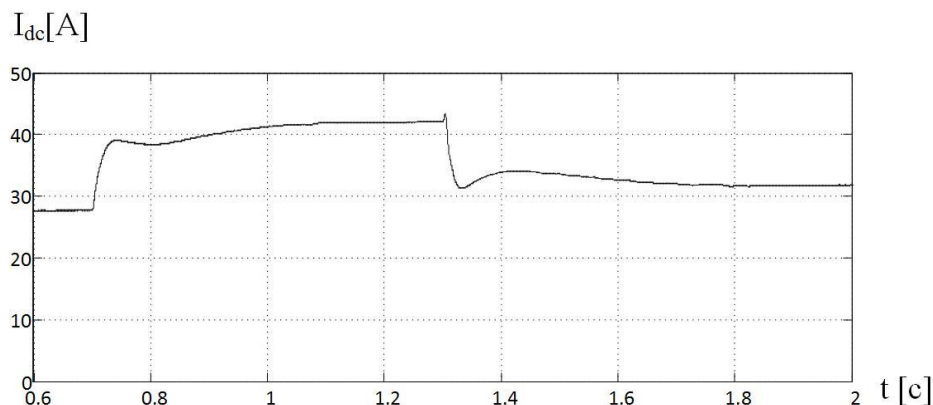


Рис. 7. Переходный процесс тока дросселя понижающего ШИП

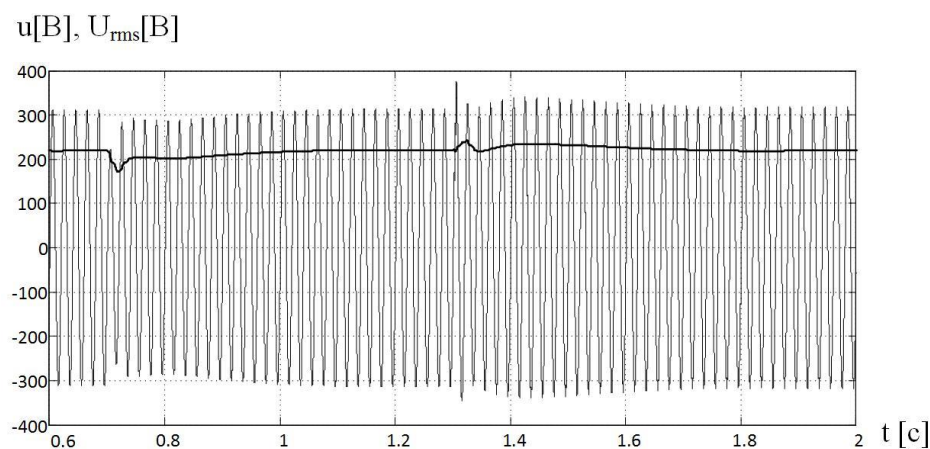


Рис. 8. Переходный процесс выходного напряжения понижающего ШИП

На рис. 9 представлены осциллограммы имитационного моделирования динамических режимов подключения нагрузки к генераторному комплексу при работе с БНЭ и без последнего. Имитационный эксперимент состоит из следующих этапов. Синхронный генератор ДППЧВ работает на нагрузку равную 20 кВт. В момент времени 0,4 с нагрузка увеличивается до 100%, т.е. становится равной 30 кВт. При этом ПИ-регулятор контура напряжения в системе управления выходит на границу насыщения. В момент времени 1,5 с подключается дополнительная («пиковая») нагрузка равная 20 кВт, которая по прошествии 0,5 с отключается.

Переходные процессы напряжения на выходе ШИП, соответствующие данному эксперименту при наличии и отсутствии в составе ДППЧВ буферного накопителя энергии, изображены на рис. 9а и рис. 9б соответственно. Из приведенных зависимостей видно, что средствами БНЭ на временном интервале «пиковой» нагрузки возможно стабилизировать напряжение на выходе ШИП и, таким образом, обеспечить требуемый баланс мощности

между ДГПЧВ и нагрузкой при сохранении энергоэффективного режима работы ДВС на пониженной частоте вращения.

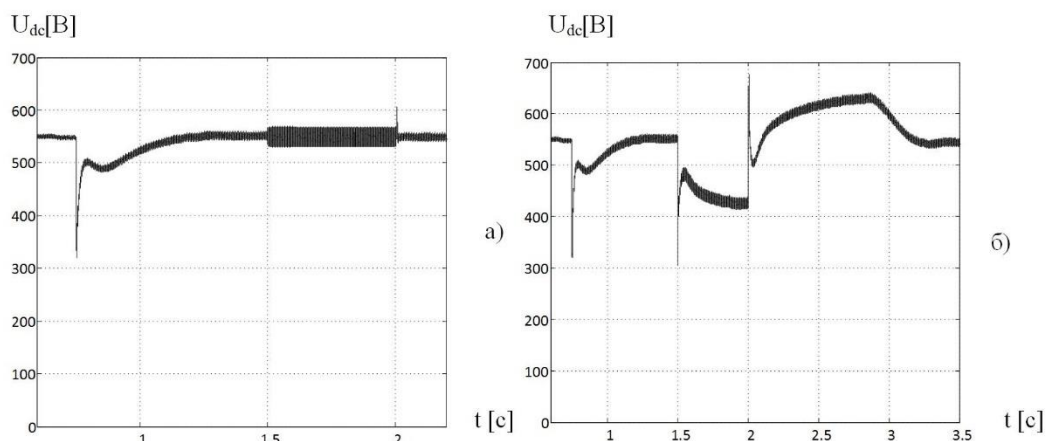


Рис. 9. Графики выходного напряжения ШИП: а – с БНЭ; б – без БНЭ

### Заключение

Разработанная математическая модель ДГПЧВ может быть использована для анализа динамических режимов коммутации нагрузки с учетом ее величины и характера, значения энергоэффективной частоты вращения ДВС, а также состава и типополнения элементов силового оборудования (рис. 1, 2): трансформаторный или безтрансформаторный; выпрямитель неуправляемого типа либо активный; ШИП понижающий или повышающий; СГ с номинальным либо повышенным значением фазного напряжения.

### Библиографический список

1. **Артюхов, И.И.** Особенности построения автономных систем электропитания на основе генераторов с изменяемой скоростью вращения вала / И.И. Артюхов, С.Ф. Степанов, Д.А. Бочкарев, Е.Т. Ербаев // Вопросы электротехнологии. – 2015. – №1. – С. 58-64.
2. **Обухов, С.Г.** Сравнительный анализ схем автономных электростанций, использующих установки возобновляемой энергетики / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // Промышленная энергетика. – 2012. – № 7. – С. 46-51.
3. **Обухов, С.Г.** Буферная система накопления электроэнергии для возобновляемой энергетики / С.Г. Обухов, И.А. Плотников, Е.Ж. Сарсикеев // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 9 (113). – С. 137-141.
4. **Хватов, О.С.** Дизель-генераторная электростанция переменной скорости вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Электротехника. – 2014. – № 3. – С. 28-32.
5. **Хватов, О.С.** Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения: монография / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев, И.С. Поляков. – Н. Новгород, 2016. – 172 с.
6. **Delgado, C.** Optimal design of a hybrid renewable energy system ecological vehicles and renewable energies / C. Delgado, J.A. Dominguez-Navarro // Ninth international conference on publication year (EVER). – 2014. – P. 1-8.
7. **Хватов, О.С.** Единая электростанция транспортного объекта с электродвижением на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Электротехника. – 2016. – № 3. – С. 35-40.
8. **Хватов, О.С.** Топливная экономичность единой электростанции автономного объекта на базе двигателя внутреннего сгорания переменной скорости вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев // Эксплуатация морского транспорта. – 2012. – № 1 (71). – С. 47-50.
9. **Chen, Y.K.** Design and implementation of energy management system with fuzzy control for DC microgrid systems / Y.K. Chen, Y.C. Wu, C.C. Song, Y.S. Chen // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – № 4. – P. 1563-1570.

*Дата поступления  
в редакцию: 30.01.2019*

**O.S. Khvatov<sup>1</sup>, A.B. Darienkov<sup>2</sup>, D.S. Kobayakov<sup>1</sup>, N.I. Kshtaltny<sup>1</sup>, M.E. Yurlov<sup>1</sup>**

**SIMULATION OF TRANSITION PROCESSES IN DIESEL-GENERATOR SET  
OF VARIABLE SPEED WITH BUFFER ENERGY STORAGE**

Volga state university of water transport<sup>1</sup>  
Nizhny Novgorod technical state university n.a. R.E. Alekseev<sup>2</sup>

**Purpose:** the aim of the article is to simulate and analyze dynamic modes of a variable speed diesel generator set with buffer energy storage in terms of switch of «peak» loads.

**Design / methodology / approach:** the mathematical calculations was performed in the Simulink package of the MatLab simulation environment. The calculations were carried out by the method of bistable Tustin approximation with a fixed step.

**Findings:** the developed mathematical simulation model can be used to verify a capacity calculation and selection of a construction of a buffer energy storage, as well as for a comparative analysis of an advantages and disadvantages of variants of a variable speed diesel generator set, taking into account the topology of its power circuit.

**Research limitations / implications:** the model of a diesel engine that does not take into account heat losses was chosen as the prime mover. In the model of the electric generator, the effect of magnetic saturation of the steel was taken into account. In the model of the buffer accumulator of energy of the lead-acid type, the temperature effect was not taken into account.

*Key words:* energy efficiency of autonomous power stations, diesel generator set of variable speed, buffer energy storage, simulation of dynamic modes in Matlab/Simulink.