

УДК: 004.942 : 621.31

С.В. НАЗАРЧУК

НТЦК ОАО «Гомсельмаш», Республика Беларусь

М.Н. ПОГУЛЯЕВ, канд. техн. наук

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Республика Беларусь

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА НАГРУЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

*В статье приведены необходимые режимы и параметры регламентных испытаний электрогенераторов под нагрузкой. Большое внимание уделяется устройствам нагружения, выполненным на основе статических полупроводниковых преобразователей в этой сфере. Описаны положительные эффекты, получаемые при использовании устройств нагружения, выполненных на основе статических полупроводниковых преобразователей, с указанием достоинств и недостатков разных конструктивных решений нагружающих устройств.*

**Ключевые слова:** испытания электрогенераторов, статические полупроводниковые преобразователи

**Введение.** Зависимость современного мира от электроэнергии настолько велика, что даже незначительные перебои с ее обеспечением могут привести к серьезным последствиям. Избежать их позволяет наличие возможности проведения качественных испытаний электрогенераторов как их производителями, так и на производственных предприятиях. Проведения испытаний под нагрузкой позволяет обеспечить определение основных технических характеристик, своевременно выявить технические неисправности и провести наладки электрогенератора.

В настоящее время существуют различные нагружающие устройства (НУ), отличающиеся стоимостью, возможностью создания различных режимов нагружения электрогенераторов, экономичностью, качеством и количеством отслеживаемых и анализируемых параметров. При этом НУ должно имитировать нагрузку в диапазоне от 10 до 110 % номинального тока генератора с коэффициентом мощности, изменяющимся в диапазоне 0,4...0,9.

До настоящего времени в основном использовались две схемы нагружения:

- использование специальных нагрузочных устройств с активной и индуктивной нагрузкой;
- нагружения на работу параллельно с сетью.

В последнее время для проведения испытаний электрогенераторов все большее внимание начинают уделять устройствам нагружения, выполненным на основе статических полупроводниковых преобразователей.

**Основная часть.** Нагружающее устройство на основе статических полупроводниковых преобразователей позволяет имитировать режимы работы, близкие к реальным, является энергосберегающим, дает наилучшие показатели в плане точности снимаемых выходных показателей генератора и существенно расширяет количественно-качественный диапазон способов испытания электрогенераторов [1, 2]. При использовании таких устройств нет необходимости производить точную синхронизацию испытуемого генератора с сетью.

Однако функционирование устройств нагружения на основе статических преобразователей еще недостаточно изучена как в практическом, так и в теоретическом плане. Выполнение данной работы направлено на получение более полного представления о процессах,

протекающих в различных частях таких устройств, с помощью имитационного моделирования на ПЭВМ с использованием специализированного пакета математического моделирования MatLab и его приложений Simulink и SimPowerSystems [3–5].

Устройство нагружения состоит из силовой части и системы управления. Основными элементами силовой части являются управляемый выпрямитель (УВ) и ведомый инвертор (ВИ), в качестве которых используются трехфазные мостовые схемы преобразователей. Устройство, выполненное по такой схеме, позволяет плавно изменять нагрузку генератора и его коэффициент мощности, т. е. создавать различные по характеру нагрузки. При этом устройство осуществляет рекуперацию вырабатываемой электроэнергии в промышленную сеть, т. е. является энергосберегающим.

Испытуемый синхронный генератор подключается на вход устройства нагружения и является источником, а питающая сеть является нагрузкой и подключается к его выходу.

Главным достоинством такой схемы является способность работать с большими токами и напряжениями, выдерживая при этом продолжительную нагрузку и импульсные воздействия. В случае использования в качестве инвертора тиристорного преобразователя основным недостатком является то, что выходной ток имеет практически прямоугольную форму [6], т. е. является источником высших гармоник. Наличие высших гармоник приводит к искажению питающего синусоидального напряжения, появлению дополнительных потерь мощности в стали трансформаторов и электрических машин. Коэффициент гармоник для маломощных сетей при этом может превысить допустимое значение в 8 %.

Чтобы уменьшить коэффициент гармоник и влияние высших гармоник на сеть, предложено вместо тиристорного использовать транзисторный инвертор с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ-инвертор) и согласующий трансформатор Т (рисунок 1).

Напряжение, поступающее от трехфазного генератора, преобразуется УВ в постоянное. Управляемый выпрямитель выполнен по мостовой схеме, в качестве полупроводниковых ключей применяются тиристоры.

В звене постоянного тока происходит сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения с помощью

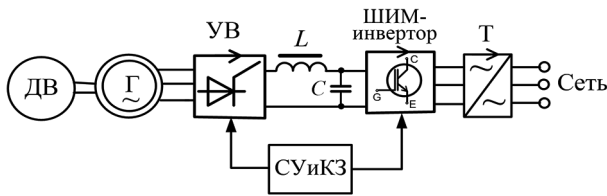


Рисунок 1 — Функциональная схема устройства нагружения с использованием ШИМ-инвертора

LC-фильтра. Звено постоянного тока служит источником питания для ШИМ-инвертора, который преобразует его в переменное с частотой сети. Изменением угла управления УВ можно задавать требуемый коэффициент мощности нагружаемого генератора в пределах 0,4 ... 0,9. Необходимый уровень нагрузки генератора  $(0,1 \dots 1) I_{\text{НОМ}}$  задается изменением начальной фазы модулирующего напряжения и коэффициента модуляции выходного напряжения ШИМ-инвертора [7, 8]. В качестве полупроводниковых ключей в инверторе применены IGBT-транзисторы. Применение IGBT с более высокой частотой переключения в преобразователе позволяет снизить уровень высших гармоник, характерных для тиристорных преобразователей и, как следствие, уменьшить добавочные потери.

Было проведено исследование энергосберегающего нагружающего устройства электрогенераторов с широтно-импульсным регулированием выходных параметров (тока) с помощью ШИМ-инвертора.

С этой целью была разработана его имитационная модель, представленная на рисунке 2. При ее создании использовались как стандартные блоки библиотек пакетов расширения SimPowerSystems и Simulink, так и вновь разработанные.

Синхронный генератор имитирует работу реальной классической синхронной машины с демпферной об-

моткой и представлен стандартным блоком Synchronous Machine pu Fundamental (параметры машины задаются в системе относительных единиц) из библиотеки Machines SimPowerSystems системы MatLab.

Для удобства работы с моделью разработана панель управления (рисунок 3), с помощью которой можно, не останавливая процесс моделирования, задавать необходимые значения тока генератора и коэффициенты мощности, следить за значениями параметров и процессами, протекающими в схеме при моделировании. Состав и количество элементов на панели можно изменять в зависимости от решаемой задачи.

**Практическое применение.** С применением разработанной имитационной модели НУ было проведено исследование трехфазного синхронного генератора с параметрами:  $S_{\text{НОМ}} = 8,1$  кВА,  $U_{\text{НОМ}} = 400$  В,  $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$ ,  $I_{\text{НОМ}} = 11,74$  А,  $n_{\text{НОМ}} = 1500$  об/мин,  $f_{\text{НОМ}} = 50$  Гц.

Для определения диапазона изменения угла управления преобразователем УВ коэффициент мощности задавался в пределах от 0,4 до 0,9. При этом снимались значения напряжений и токов в схеме, а также их осциллограммы.

Эксперимент производился для трех значений тока нагрузки генератора, равных  $0,1 \cdot I_{\text{НОМ}} = 1,17$  А,  $I_{\text{НОМ}} = 11,74$  А и  $1,1 \cdot I_{\text{НОМ}} = 12,91$  А. Такие значения токов требуются по условиям технического регламента при проведении испытаний.

Анализ полученных данных показывает, что при изменении коэффициента мощности  $K_M$  в диапазоне от 0,4 до 0,9 угол управления  $\alpha$  меняется в пределах от  $65,07^\circ$  до  $20,57^\circ$  при токе нагрузки генератора, равном  $0,1 \cdot I_{\text{НОМ}}$ , и от  $59,1^\circ$  до  $10,83^\circ$  при токе нагрузки генератора —  $1,1 \cdot I_{\text{НОМ}}$ . В номинальном режиме работы генератора угол управления  $\alpha$  меняется в пределах от  $59,83^\circ$  до  $11,43^\circ$ . Как видно из приведенных выше данных, с изменением тока нагрузки зависимость угла управления  $\alpha$  практи-

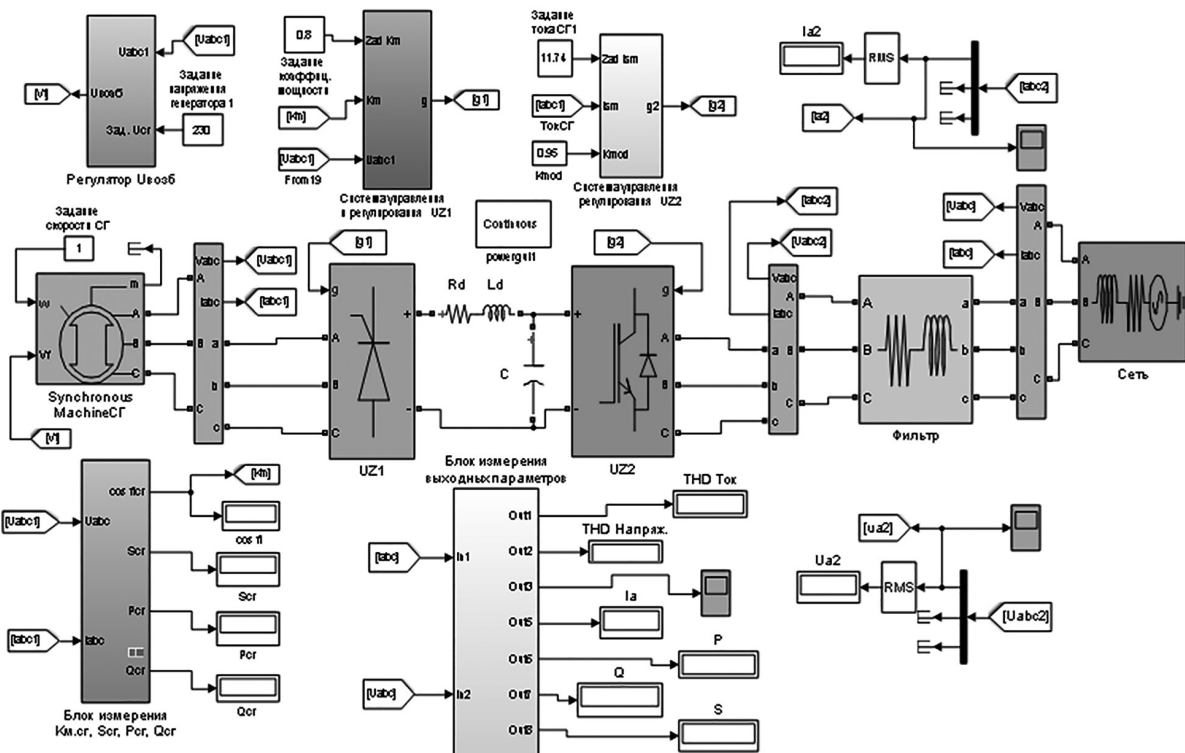


Рисунок 2 — Имитационная модель для исследования НУ

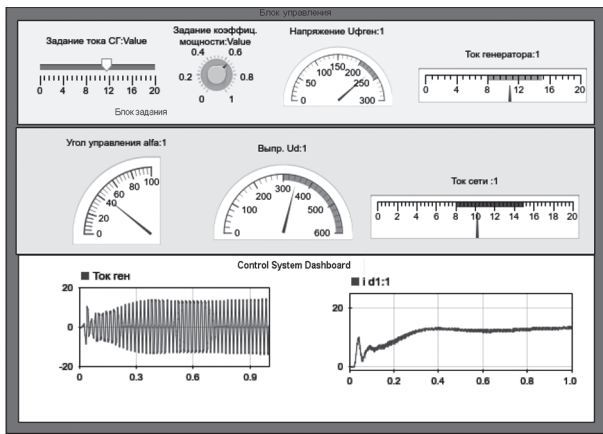


Рисунок 3 — Панель управления имитационной моделью НУ

чески не меняется. Только при 10-процентной нагрузке присутствует небольшое смещение угла управления примерно на  $5^\circ$ , что обусловлено переходом преобразователя в режим прерывистого тока. Для получения номинального коэффициента мощности, равного 0,8, угол управления выпрямителем должен составлять от  $20^\circ \dots 27^\circ$  в зависимости от тока нагрузки. Были получены и проанализированы десятки временных диаграмм в различных узлах схемы. Для примера, на рисунке 4 представлены осциллограммы напряжения после ШИМ-инвертора и его первая гармоника, напряжения на выходе устройства (напряжение сети), выходного тока, отдаваемые в сеть.

Для сравнения, на рисунке 5 представлена осциллограмма выходного тока устройства нагруженного с инвертором, выполненным на тиристорах. Видно, что форма тока близка к прямоугольной, а коэффициент

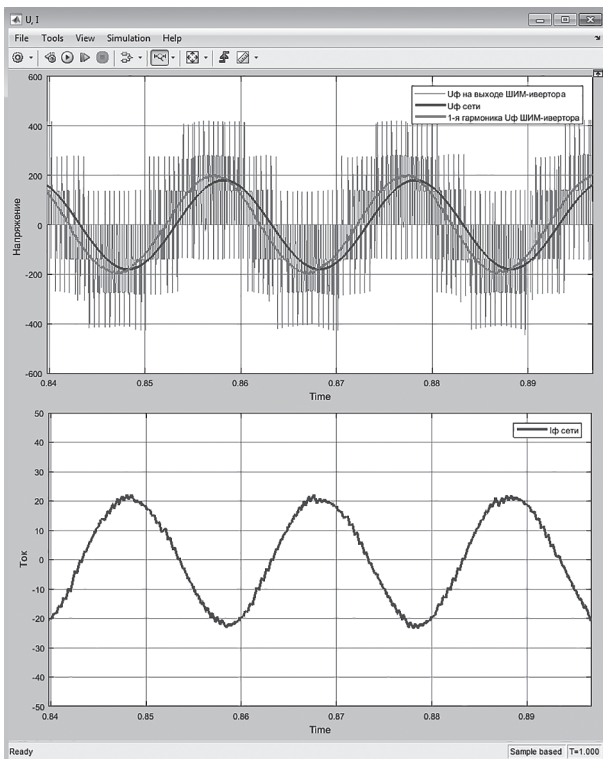


Рисунок 4 — Осциллограммы фазных напряжений токов на выходе НУ при номинальных значениях коэффициента мощности и тока нагрузки

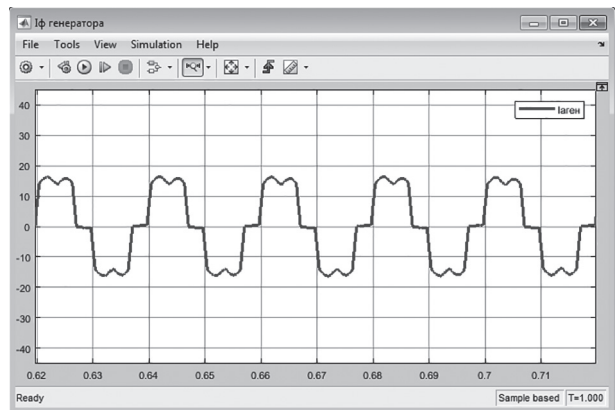


Рисунок 5 — Осциллограммы фазного тока генератора при номинальных значениях коэффициента мощности и тока нагрузки

несинусоидальности тока при номинальной нагрузке достигает значения 24 %. Использование в устройстве транзисторного инвертора с широтно-импульсной модуляцией позволяет существенно улучшить форму тока и снизить коэффициент несинусоидальности до 5,82 %, тем самым добиться снижения влияния устройства на сеть [9, 10].

Анализ результатов исследований НУ на имитационной модели показал, что:

- устройство нагружения является энергосберегающим. Вся активная мощность, вырабатываемая генератором, за вычетом потерь, передается в сеть;
- в режимах работы, близких номинальному, нагрузочный обладает высоким коэффициентом полезного действия (до 92 %). При нагрузке  $0,1 \cdot I_{\text{ном}}$  коэффициент полезного действия снижается до 54,4 %;
- суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (коэффициент искажений синусоидальности кривой напряжения) на входе нагрузителя достаточно большой и может достигать 42 %. В то же время влияние нагрузителя на питающую сеть невелико ( $K_{I2} = 3,47 \dots 4,52 \%$ ) и не превышает нормально допустимых значений (8 %), установленных ГОСТ 30824.4.30-2013 и ГОСТ 32144-2013 для сетей 0,38 кВ;
- суммарный коэффициент гармонических составляющих тока (коэффициент несинусоидальности тока) на входе  $K_{I1}$  составляет 22...27 %. На выходе устройства, за счет применения ШИМ-инвертора, коэффициент  $K_{I2}$  составляет 5,42...6,41 %.
- нагружающее устройство позволяет задавать требуемый коэффициент мощности для испытуемого генератора в диапазоне от 0,4 до 0,9.

**Заключение.** В результате выполнения научно-исследовательской работы была создана компьютерная модель энергосберегающего нагружающего устройства электрогенераторов с широтно-импульсным регулированием выходных параметров в программной среде MATLAB с использованием пакетов расширения SimPowerSystems и Simulink.

Модель НУ электрогенераторов позволяет производить исследование статических и динамических режимов работы нагружающего устройства, рассчитывать и анализировать параметры токов, напряжений, снимать и строить необходимые характеристики. При этом коэффициент гармоник выходного тока не превышает допустимых значений.

Устройство является энергосберегающим и обеспечивает получение режимов, близких к реальным и необходимым при проведении регламентных испытаний электрогенераторов под нагрузкой.

Полученные результаты в значительной степени являются новыми, имеют научное и практическое значение и в дальнейшем сократят сроки и затраты на разработку и создание опытных образцов энергосберегающих нагружающих устройств электрогенераторов.

### Список литературы

1. Энергоэффективные испытательные стенды / И.В. Дорошенко [и др.] // Энергоэффективность. — 2018. — № 9. — С. 26–30.
2. Энергосберегающее устройство нагружения резервных электрогенераторов на основе статических преобразователей / С.В. Назарчук, М.Н. Погуляев // Мат. междунар. науч.-практ. онлайн конф. молод. ученых, маг., студ. и учаш. «Родной край — основа всех начинаний поколения молодых», Рудный, 22–23 апр. 2021 г. / Рудненский индустриальный ин-т; редкол.: А.Б. Найзабеков (гл. ред.) [и др.]. — Рудный, 2021. — С. 432–435.
3. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Sim Power Systems и Simulink / И.В. Черных. — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. — 288 с.
4. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: учеб. пособие / С.Г. Герман-Галкин. — СПб.: КОРОНА принт, 2001. — 320 с.
5. Дьяконов, В.П. Matlab и Simulink в электроэнергетике: справ. / В.П. Дьяконов, А.А. Пеньков. — М.: Горячая линия-Телеком, 2009. — 816 с.
6. Чигринцев, А.А. Анализ гармонических составляющих выходных напряжения и тока устройства нагружения синхронных электрогенераторов / А.А. Чигринцев, С.В. Назарчук, М.Н. Погуляев // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: мат. XXI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 22–23 апр. 2021 г.: в 2 ч. / ГГТУ им. П.О. Сухого; под общ. ред. А.А. Бойко. — Гомель, 2021. — Ч. 2. — С. 31–34.
7. Назарчук, С.В. Имитационное моделирование устройства нагружения электрогенераторов с широтно-импульсным регулированием выходных параметров / С.В. Назарчук, М.Н. Погуляев // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: мат. XXI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 22–23 апр. 2021 г.: в 2 ч. / ГГТУ им. П.О. Сухого; под общ. ред. А.А. Бойко. — Гомель, 2021. — Ч. 2. — С. 28–31.
8. Погуляев, М.Н. Улучшение гармонического состава выходного тока устройства нагружения резервных электрогенераторов / М.Н. Погуляев, М.В. Рябков // Современные проблемы машиноведения: сб. науч. тр.: в 2 ч. / ГГТУ им. П.О. Сухого; под общ. ред. А.А. Бойко. — Гомель, 2023. — Ч. 2. — С. 55–57.
9. Васильев, Б.В. Исследование характеристик трехфазного мостового преобразователя: метод. рук. / Б.В. Васильев, Е.В. Аристов, Р.А. Хузин. — Пермь: ПГТУ, 2006. — 25 с.
10. Проектирование электротехнических устройств: учеб. пособие / В.А. Анисимов [и др.]. — М.: Изд-во МЭИ, 2001. — 128 с.

Nazarchuk S.V., Pogulyaev M.N.

### Simulation of the load device of electric generators with pulsed-width regulation of output parameters

The article presents the necessary modes and parameters of routine tests of electric generators under load. It indicates the presence of great attention to loading devices made on the basis of static semiconductor converters in this area. The positive effects are described which are obtained when using load devices made on the basis of static semiconductor converters, indicating the advantages and disadvantages of various design solutions for loading devices.

Поступила в редакцию 04.07.2023.