

# Оценка точности математической модели системы накопления энергии по результатам натурного эксперимента на газопоршневой электростанции

УДК 620.09:004.94

**В статье приведена оценка адекватности и точности математической модели системы накопления энергии (СНЭ) по результатам натурного эксперимента в автономной энергосистеме, включающей в свой состав газопоршневую электростанцию, активную резкопеременную нагрузку и головной промышленный образец СНЭ номинальной мощностью 1200 кВА, энергоемкостью 400 кВт·ч и напряжением 10 кВ на базе литий-ионных аккумуляторных батарей. Описана структура разработанной математической модели СНЭ для расчета переходных процессов. Сравнение результатов натурных испытаний и расчетов с использованием математической модели СНЭ показало их качественное и количественное совпадение, достаточное для научных и инженерных исследований функционирования СНЭ в составе энергосистем.**

## **Гужавина В.В.,**

руководитель службы аналитики, методологии и технического развития ООО «Системы накопления энергии»

## **Нестеренко Г.Б.,**

инженер службы аналитики, методологии и технического развития ООО «Системы накопления энергии», аспирант кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ

## **Пранкевич Г.А.,**

инженер службы аналитики, методологии и технического развития ООО «Системы накопления энергии»

## **Бачурин П.А.,**

ассистент кафедры Электроники и электротехники НГТУ

## **Гладков Д.С.,**

магистрант кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ

## **Зырянов В.М.**

к.т.н., с.н.с., доцент кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ

## **Ключевые слова:**

математическая модель, система накопления энергии, система накопления электрической энергии, накопитель энергии, газопоршневая установка, экспериментальные исследования, автономная энергосистема, резкопеременная нагрузка, нагрузочная диаграмма, литий-ионная аккумуляторная батарея

По мере своего развития электроэнергетические системы становятся все более сложными не только по своей структуре, но и по функциональным возможностям. В их составе появляются принципиально новые элементы энергосистемы, такие как системы накопления энергии (СНЭ), которые позволяют решать ряд сложных задач комплексно и гораздо более эффективно, чем это делается традиционными методами [1–5].

Развитие систем накопления энергии в России происходит все более интенсивно, что обусловлено прогрессом в технологиях и снижением стоимости оборудования, в частности литий-ионных аккумуляторных батарей. Применение СНЭ в составе объектов распределенной энергетики, особенно в автономных энергосистемах, в настоящее время является одним из наиболее рентабельных направлений применения СНЭ в российской электроэнергетике [6, 7].

Основными источниками электроэнергии на автономных электростанциях нефтегазодобывающих предприятий являются дизельные (ДГУ), газотурбинные (ГТУ) и газопоршневые установки (ГПУ), для которых режим работы при низкой загрузке приводит к негативным последствиям. При снижении нагрузки этих установок ниже 30–40% повышается износ элементов приводных двигателей, сокращается их моторесурс и значительно увеличивается расход топлива [8]. Неравномерный график нагрузки с большими пиками и глубокими провалами, характерный для добывающих предприятий, также увеличивает удельный расход топлива и моторесурса. Более того, ГПУ при значительных набросах или сбросах нагрузки могут аварийно отключаться технологическими защитами во избежание повреждения газопоршневого двигателя.

ля. Кроме того, из-за соизмеримости мощностей генераторов и двигателей нагрузки резкие изменения режима работы последних приводят к ухудшению качества электроэнергии и формируют потребность в «быстром» резерве мощности.

Применение систем накопления энергии в изолированных энергосистемах повышает надежность и качество электроснабжения, снижает удельный расход топлива, а также приводит к снижению потребности в резервных генерирующих мощностях. При наличии в составе энергосистемы СНЭ переходные процессы протекают со значительно меньшими отклонениями частоты и напряжения [9].

Как и в случае с традиционными элементами энергосистем, для выбора параметров СНЭ, разработки и отработки алгоритмов управления, анализа целесообразности и эффективности применения СНЭ необходимы соответствующие математические модели, позволяющие производить расчеты установившихся режимов и переходных процессов.

Настоящая статья посвящена оценке точности и адекватности математической модели СНЭ, разработанной авторами, путем сравнения результатов расчетов и результатов испытаний СНЭ-10-1200-400 в составе экспериментальной энергосистемы с газопоршневой электростанцией и резкопеременной нагрузкой.

## ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СНЭ

В связи с отсутствием в электроэнергетических программно-вычислительных комплексах (ПВК) стандартных моделей СНЭ, позволяющих проводить расчеты переходных процессов в энергосистемах, авторами была разработана соответствующая модель СНЭ. Для разработки был использован ПВК DigSILENT PowerFactory.

В настоящей работе используется модель СНЭ, усовершенствованная относительно модели, описанной авторами в [10–12]. В процессе заряда и разряда учитывается коэффициент полезного действия СНЭ. Кроме того, учитываются саморазряд накопителей энергии и зависимость располагаемой мощ-

ности СНЭ от уровня заряда. Соответствующая зависимость задается пользователем, что позволяет использовать модель для имитации СНЭ с различными типами накопителей энергии.

Основное назначение расчетов с использованием модели — оценка правильности выбора параметров СНЭ, апробация алгоритмов управления СНЭ, оценка эффективности работы СНЭ в различных условиях. Модель позволяет рассчитывать переходные процессы с учетом управляемого обмена активной и реактивной мощностью СНЭ и энергосистемы при основных ограничениях, накладываемых характеристиками элементов СНЭ.

Модель СНЭ имеет 2 основные структуры, переключение между которыми осуществляется пользователем в зависимости от задач исследования:

- 1) структура для расчета электромеханических переходных процессов (по действующим значениям);
- 2) структура для расчета электромагнитных переходных процессов (по мгновенным значениям).

В основе структуры модели СНЭ для расчета электромеханических переходных процессов (рисунк 1) с целью снижения требований к вычислительным ресурсам и сокращения времени расчета для моделирования работы преобразователя используется управляемый источник мощности (блок статического генератора). Также в структурную схему модели входят: блок параметров СНЭ; блоки моделирования динамических процессов в СНЭ (блок расчета уровня заряда, блок контроля уровня заряда, блок ограничения активной мощности, блок ограничения полной мощности, блок задержки); блок системы управления СНЭ.

В блоке параметров задаются основные параметры СНЭ. Блоки, моделирующие функционирование подсистем СНЭ во времени, представляют собой наборы элементов и функций, позволяющие источнику мощности выдавать или потреблять энергию с учетом особенностей СНЭ. В блок системы управления закладываются алгоритмы, реализующие заданные режимы функционирования СНЭ.

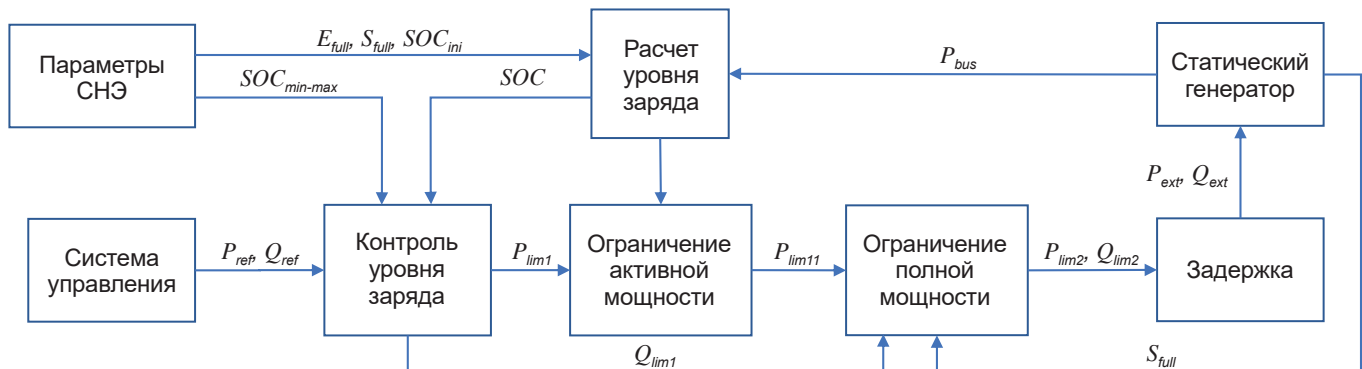


Рис. 1. Структура модели СНЭ для расчета электромеханических переходных процессов:  $E_{full}$  — номинальная энергоемкость СНЭ, МВт·ч;  $S_{full}$  — номинальная мощность СНЭ, МВА;  $SOC_{ini}$  — начальный уровень заряда СНЭ, о.е.;  $SOC_{min-max}$  — ограничения по максимальному и минимальному уровню заряда СНЭ, о.е.;  $SOC$  — текущий уровень заряда СНЭ, о.е.;  $P_{ref}$  и  $Q_{ref}$  — сигналы требуемых мощностей, МВт и Мвар;  $P_{lim1}$  и  $Q_{lim1}$  — желаемые мощности с учетом ограничений по уровню заряда, МВт и Мвар;  $P_{lim11}$  — желаемая активная мощность с учетом ограничений по располагаемой мощности, МВт;  $P_{lim2}$  и  $Q_{lim2}$  — желаемые мощности с учетом ограничений по уровню заряда, располагаемой мощности и полной мощности, МВт и Мвар;  $P_{ext}$  и  $Q_{ext}$  — сигналы, задающие выдаваемую или потребляемую мощность СНЭ с учетом ограничений, МВт и Мвар;  $P_{bus}$  — активная мощность, выдаваемая или потребляемая СНЭ, МВт

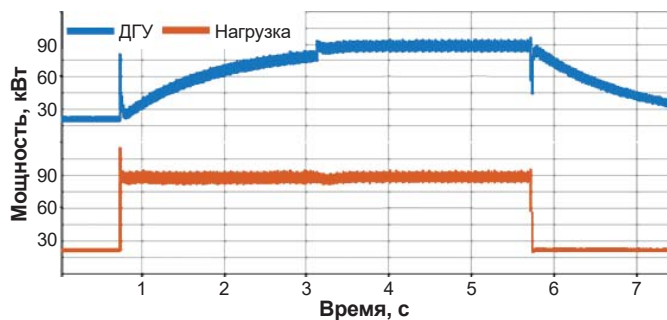


Рис. 2. Эксперимент: переходный процесс при работе СНЭ в режиме ограничения скорости изменения мощности ДГУ

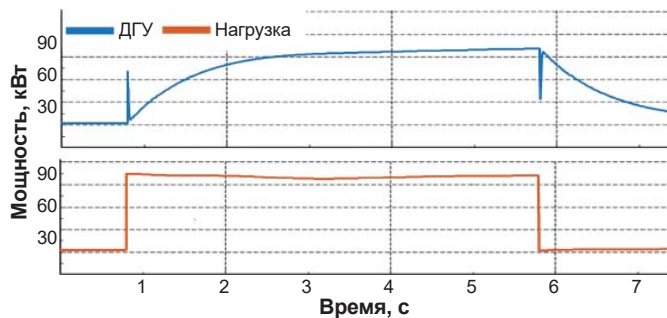


Рис. 3. Расчет: переходный процесс при работе СНЭ в режиме ограничения скорости изменения мощности ДГУ

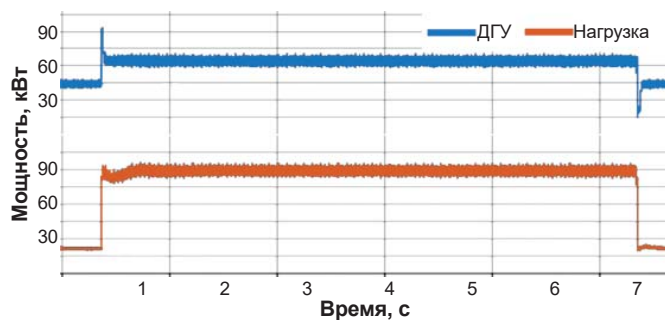


Рис. 4. Эксперимент: переходный процесс при ограничении минимума и максимума мощности ДГУ

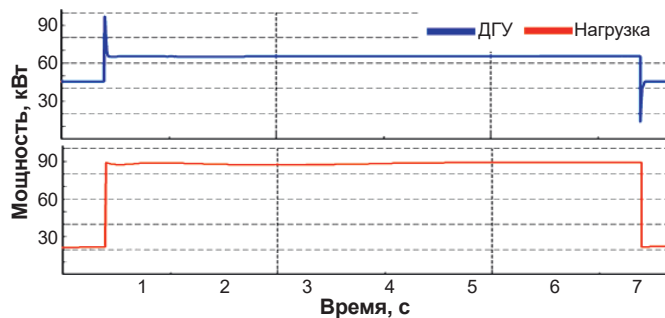


Рис. 5. Расчет: переходный процесс при ограничении минимума и максимума мощности ДГУ

Структура модели СНЭ для расчета электромагнитных переходных процессов отличается от описанной выше тем, что управляемый источник мощности заменяется на транзисторный преобразователь, управляемый посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с использованием теории мгновенной мощности Хирофуми Акаги [13]. Кроме того, добавляется блок фазовой автоподстройки частоты, осуществляющий синхронизацию с энергосистемой.

Первичная оценка достоверности математической модели СНЭ проводилась путем сравнения результатов расчета (рисунки 3, 5) с результатами натурного эксперимента (рисунки 2, 4), проведенного в Новосибирске в автономной энергосистеме, включающей СНЭ мощностью 100 кВА и энергоемкостью 153 кВт·ч с аккумуляторами LT-LYP300AH, дизель-генераторную установку ЭДД-100 мощностью 100 кВт и коммутируемую нагрузку максимальной мощностью 89 кВт [14].

Сравнение расчетов на модели с натурными испытаниями показало, что разработанная модель СНЭ обеспечивает качественное и количественное соответствие реальной СНЭ.

## СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ И РАСЧЕТОВ ПО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

### 1. Описание испытаний СНЭ-10-1200-400 при совместной работе с ГПУ в экспериментальной энергосистеме

В мае 2019 года в Новосибирске проведены испытания системы накопления энергии СНЭ-10-1200-400 при совместной работе с ГПУ в составе экспериментальной энергосистемы. Цель испытаний заключалась в подтверждении работоспособности СНЭ в соответствии с требованиями технического задания. СНЭ должна была эффективно сглаживать набросы и сбросы мощности нагрузки, получающей

питание от ГПУ, которые имеют достаточно серьезные ограничения по допустимой динамике изменения нагрузки, а именно:

- при резких набросах/сбросах нагрузки более 10–20% от номинальной мощности велика вероятность отключения ГПУ технологической защитой;
- скорость наброса/сброса мощности для того, чтобы не сработала технологическая защита, должна составлять не более 1% в секунду от номинальной мощности ГПУ;
- при длительной работе нагрузка ГПУ должна составлять не менее 30–40% от номинальной мощности ГПУ [8].

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 6. В составе установки:

- две ГПУ GmbH MWM TCG 2020 V12K мощностью 1125 кВт каждая;
- силовые трансформаторы и выключатели;
- секционированная активная нагрузка мощностью 1200 кВт;
- система накопления энергии СНЭ-10-1200-400 мощностью 1200 кВА и энергоемкостью 400 кВт·ч

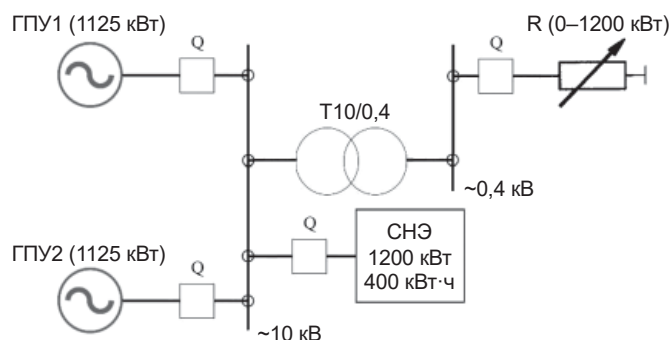


Рис. 6. Принципиальная схема испытательной экспериментальной установки

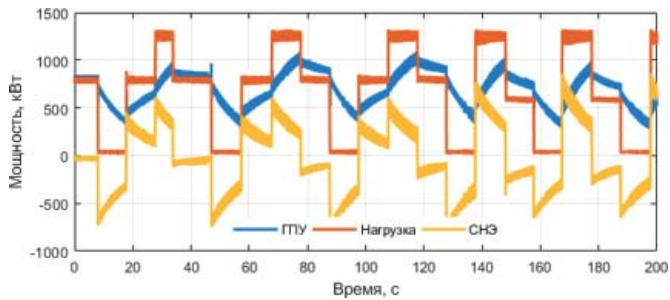


Рис. 7. Эксперимент: переходный процесс при работе СНЭ в режиме ограничения скорости изменения мощности ГПУ с уставкой 15 кВт/с

производства ООО «Системы накопления энергии»;

– контрольно-измерительное и регистрирующее оборудование.

Работоспособность СНЭ испытывалась в двух режимах:

- 1) ограничение скорости изменения мощности ГПУ во время набросов и сбросов мощности;
- 2) ограничение максимальной и минимальной мощности ГПУ в разных нагрузочных циклах при различных уставках.

## 2. Создание математической модели энергосистемы

Модель экспериментальной энергосистемы создана в ПВК PowerFactory. Для моделирования СНЭ используется разработанная авторами модель СНЭ, описанная выше. В модель СНЭ заложены параметры накопителей энергии, соответствующие литий-железо-фосфатным аккумуляторам. В системе управления модели СНЭ реализованы те же алгоритмы, что и в системе управления СНЭ-10-1200-400.

Использована модель ГПУ с автоматическим регулятором скорости (АРС), описанная в [15]. Параметры АРС подобраны таким образом, чтобы при наборе мощности график изменения скорости вращения был максимально близок к графику, полученному при заводских испытаниях ГПУ GmbH MWM TCG 2020 V12K. В качестве автоматического регулятора возбуждения (АРВ) использован типовой регулятор,

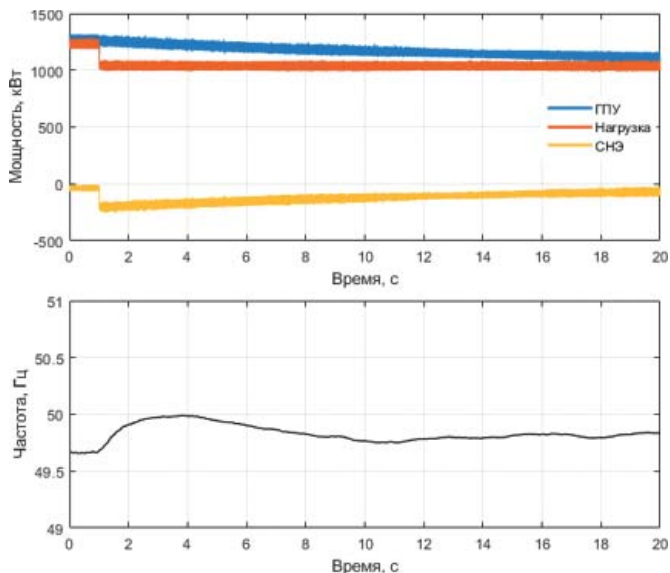


Рис. 9. Эксперимент: переходный процесс при сбросе мощности нагрузки с 1200 кВт до 1000 кВт

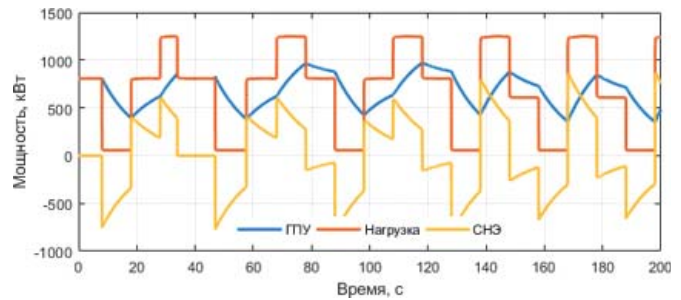


Рис. 8. Расчет: переходный процесс при работе СНЭ в режиме ограничения скорости изменения мощности ГПУ с уставкой 15 кВт/с

имеющийся в библиотеке PowerFactory: 1968 IEEE Type 1 Excitation System.

Модель энергосистемы имеет в своем составе элемент изменяемой активной нагрузки. График нагрузки задан в соответствии с суммарным графиком мощности, потребляемой нагрузочными модулями на испытаниях СНЭ-10-1200-400.

## 3. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов

Ограничение скорости изменения мощности ГПУ во время набросов и сбросов мощности. Опыт, при котором СНЭ работала по алгоритму ограничения скорости изменения мощности нагрузки на ГПУ (рисунок 7), проводился при повторно-кратковременном характере изменения активной нагрузки: длительность цикла 10 с, диапазон изменения мощности от 0 до 1200 кВт. Уставка алгоритма СНЭ: скорость изменения мощности ГПУ  $\leq 15$  кВт/с. При превышении заданной уставки СНЭ обеспечивала плавное изменение мощности ГПУ при резких изменениях мощности нагрузки. Время реакции СНЭ составляло не более 20 мс. Результаты расчета на модели СНЭ в том же режиме (рисунок 8) показали высокое качественное и количественное сходство с результатами натурального эксперимента.

Экспериментальная осциллограмма при сбросе мощности нагрузки с 1200 кВт до 1000 кВт представлена на рисунке 9. Результаты расчета на модели представлены на рисунке 10.

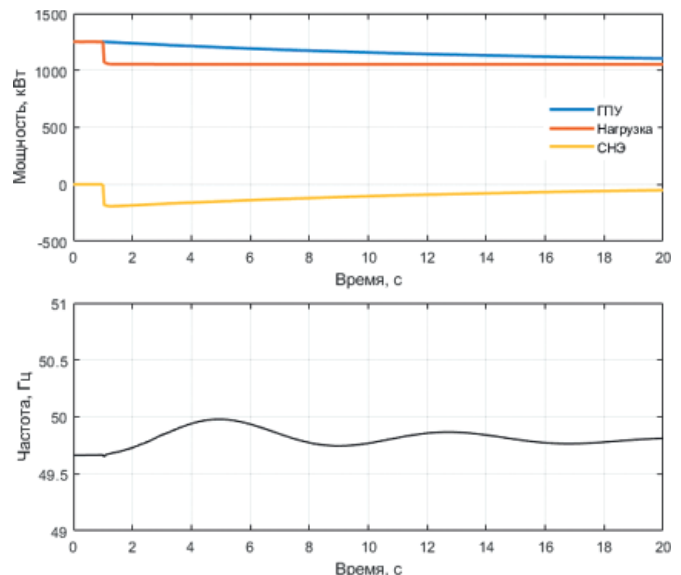


Рис. 10. Расчет: переходный процесс при сбросе мощности нагрузки с 1200 кВт до 1000 кВт

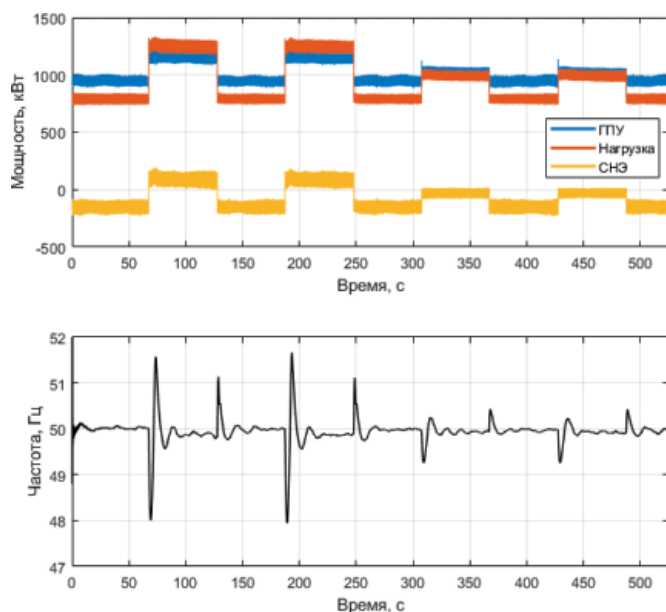


Рис. 11. Эксперимент: переходный процесс при ограничении минимума и максимума мощности ГПУ

Ограничение максимальной и минимальной мощности ГПУ в разных нагрузочных циклах при различных уставках. В ходе опыта СНЭ работала на ограничение суммарной максимальной и минимальной мощности двух ГПУ (нижняя уставка — 900 кВт, верхняя — 1100 кВт). При выходе мощности нагрузки за пределы указанных значений разница между уставкой и фактической нагрузкой компенсировалась за счет СНЭ. На интервале от 0 до 250 секунд мощность нагрузки изменялась от 800 до 1200 кВт, далее — от 800 до 1000 кВт (рисунок 11).

Сравнение расчета на модели СНЭ (рисунок 12) с экспериментальными осциллограммами в режиме ограничения минимума и максимума мощности ГПУ показало достаточное для инженерных исследова-

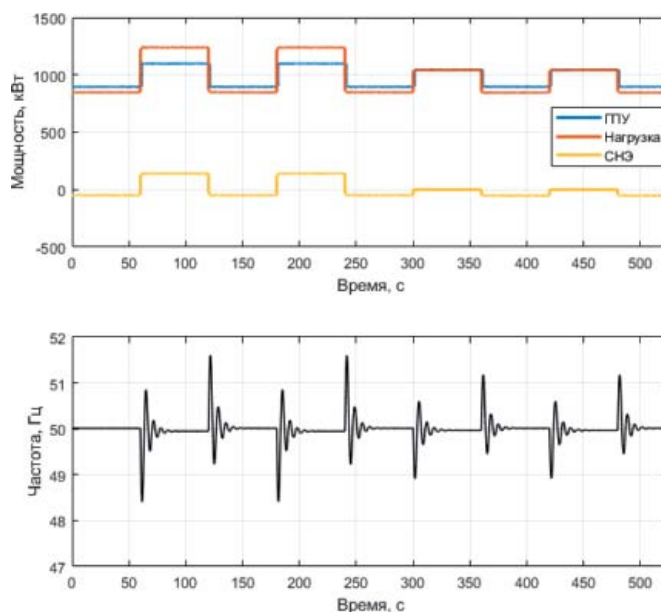



Рис. 12. Расчет: переходный процесс при ограничении минимума и максимума мощности ГПУ

ний качественное и количественное совпадение результатов.

### ВЫВОДЫ

Математическая модель СНЭ для расчета переходных процессов в энергосистемах разработана и реализована в программно-вычислительном комплексе DlgSILENT PowerFactory. Модель предназначена для расчетов режимов, переходных процессов и анализа устойчивости энергосистем, в составе которых имеются СНЭ. Также модель может быть использована при разработке и апробации алгоритмов управления СНЭ, повышающих управляемость и надежность энергосистем. Точность модели подтверждена путем сравнения результатов расчетов с осциллограммами, полученными в ходе испытаний СНЭ-10-1200-400 в составе экспериментальной энергосистемы с ГПУ. 

### ЛИТЕРАТУРА

- Бердников Р.Н., Фортов В.Е., Шакарян Ю.Г., Деньщиков К.К. Гибридный накопитель энергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов // Энергия единой сети, 2013, № 1. С. 40–51.
- Zobaa A.F. Energy storage technologies and applications. Rijeka, Croatia: Intech, 2013, p. 328.
- Конonenko В.Ю., Вещунов О.В., Билашенко В.П., Смоленцев Д.О. Эффекты применения накопителей энергии в изолированных энергосистемах России // Арктика: экология и экономика, 2014, № 2(14). С. 61–66.
- Li J., Xiong R., Yang Q. et al. Design/test of a hybrid energy storage system for primary frequency control using a dynamic droop method in an isolated microgrid power system. Applied Energy, 2017, vol. 201, pp. 257–269.
- Robyns B., François B., Delille G., Saudemont C. Energy storage in electric power grids. UK: ISTE and John Wiley & Sons, 2015, p. 306.
- Чаусов И.С., Бурдин И.А., Ряпин И.Ю. и др. Рынок систем накопления электроэнергии в России: потенциал развития. Под ред. Ю.А. Удальцова, Д.В. Холкина. М.: Центр стратегических разработок, 2018. 69 с.
- Концепция развития рынка систем хранения электроэнергии. Министерство энергетики Российской Федерации. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/9029>.
- Илюшин П.В., Куликов А.Л., Березовский П.К. Эффективное использование накопителей электрической энергии для предотвращения отключений объектов распределенной генерации при кратковременных отклонениях частоты // Релейная защита и автоматизация, 2019, № 4. С. 32–39.
- Бачурин П.А., Гладков Д.С., Зырянов В.М., Кучак С.В., Нестеренко Г.Б., Лебедев Д.Е., Решетников А.Н., Савицкий А.М. Испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10-1200-400 при совместной работе с ГПУ в составе экспериментальной энергосистемы // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2020, № 2(59). С. 18–24.
- Кирьянова Н.Г., Бачурин П.А., Зырянов В.М., Кучак С.В., Метальников Д.Г., Нестеренко Г.Б., Потапенко А.М., Пранкевич Г.А. Математи-

ческая модель системы накопления энергии в составе энергосистемы / Материалы 14 Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Т. 7. С. 228–234.

11. Армеев Д.В., Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Нестеренко Г.Б., Пранкевич Г.А. Моделирование энергосистем с накопителями энергии // Электропитание, 2018, № 2. С. 22–33.
12. Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Нестеренко Г.Б., Пранкевич Г.А. Уни-

версальная математическая модель системы накопления электрической энергии / Материалы 9 Междунар. молодеж. науч.-техн. конф. «Электроэнергетика глазами молодежи». Казань: Изд-во КГЭУ, 2018. Т. 3. С. 127–130.

13. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. IEE Press, John Wiley and Sons Inc., 2007, p. 389.
14. Зырянов В.М., Кучак С.В., Бачурин П.А., Харитонов С.А., Металь-

ников Д.Г., Гармаш Т.Г., Ворошилов А.Н., Фролов Д.А. Экспериментальные исследования и испытания совместной работы системы накопления энергии и ДГУ в составе автономной энергосистемы // Промышленная энергетика, 2018, № 10. С. 2–10.

15. Вагин Г.Я., Солнцев Е.Б., Мамонов А.М., Петров А.А. Математическая модель электроагрегата мини-ТЭЦ на базе явнополюсного синхронного генератора // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов, 2015, т. 326, № 8. С. 92–101.

## REFERENCES

1. Berdnikov R.N., Fortov V.E., Shakarjan Ju.G., Denshnikov K.K. Hybrid energy storage for UNEG based on batteries and supercapacitors. Energy of unified grid, 2013, no. 1, pp. 40-51. (in Russian)
2. Zoba A.F. Energy storage technologies and applications. Rijeka, Croatia: Intech, 2013. 328 p.
3. Kononenko V.Ju., Veshhunov O.V., Bilashenko V.P., Smolencev D.O. Effects of the use of energy storage in isolated power systems in Russia. Arctic: Ecology and Economy, 2014, no. 2(14), pp. 61-66. (in Russian)
4. Li J., Xiong R., Yang Q. et al. Design/test of a hybrid energy storage system for primary frequency control using a dynamic droop method in an isolated microgrid power system. Applied Energy, 2017, vol. 201, pp. 257-269.
5. Robyns B., François B., Delille G., Saudemont C. Energy storage in electric power grids. UK: ISTE and John Wiley & Sons, 2015, 306 p.
6. Chausov I.S., Burdin I.A., Ryapin I.Yu. et al. Energy storage systems market in Russia: development potential. Edited by Udalcova Yu.A., Holkina D.V. Moscow, Center for Strategic Research, 2018, 69 p. (in Russian)
7. The concept of development of the market for energy storage systems. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/9029>.
8. Ilyushin P.V., Kulikov A.L., Berezovskiy P.K. Effective application of electric energy storage for prevention of distributed generation units tripping due to short-time frequency deviations. Relay protection and automation, 2019, no. 4, pp. 32-39. (in Russian)
9. Bachurin P. A., Gladkov D.S., Zyryanov V. M., et al. Testing of industrial design energy storage system (ESS-10-1200-400) and gas piston units in experimental power system. ELECTRIC POWER. Transmission and distribution, 2020, no. 2, pp.18-24. (in Russian)
10. Kiryanova N.G., Bazhurin P.A., Zyryanov V.M., et al. Mathematical model of the energy storage system in the power system. Actual problems of electronic instrument engineering, 2018, pp. 228-234. (in Russian)
11. Armeev D.V., Zyryanov V.M., et al. Modeling of energy systems with energy storage devices. Power Supply, 2018, no. 2., pp. 22-23. (in Russian)
12. Kiryanova N.G., Zyryanov V.M, et al. Multi-operated mathematical model of electrical energy storage system. Power energy through the eyes of youth, 2018, pp. 127-130. (in Russian)
13. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. IEE Press, John Wiley and Sons Inc., 2007, p. 389.
14. Zyryanov V.M., Kuchak S.V., Bachurin P.A., Kharitonov S.A., Metal'nikov D.G., Garmash T.G., Voroshilov A.N., Frolov D.A. Experimental studies and tests of the joint operation of the energy storage system and the DGU as a part of an autonomous power system // Industrial power engineering, 2018, no. 10, pp. 2-10. (in Russian)
15. Vagin G.Ya., Solncev E.B., Mamonov A.M., Petrov A.A. Mathematical model of a mini-power plant based on a clear-pole synchronous generator. TPU News. 2015, no. 8, pp. 92-101. (in Russian)

В издательстве Инфра-Инженерия вышла в свет новая книга к.т.н. В. И. Гуревича объемом свыше 500 страниц под интригующим названием **«Электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва и защита электрооборудования от него»**



В этой необычной книге рассказывается об истории развития военных ядерных программ в СССР и США, роли разведки в создании ядерного оружия в СССР, обнаружении электромагнитного импульса при ядерном взрыве (ЭМИ ЯВ), многочисленных испытаниях ядерных боеприпасов.

В доступной для неспециалистов в области ядерной физики форме описан процесс образования ЭМИ ЯВ при подрыве ядерного боеприпаса на большой высоте, показано влияние многочисленных факторов на интенсивность ЭМИ ЯВ и его параметры. Рассмотрено влияние ЭМИ ЯВ на электронные компоненты и устройства, а также и на силовое электрооборудование энергосистем.

Большую часть книги занимает описание практических (а не теоретических, как в сотнях отчетов на эту тему) средств и методов защиты электронного

и электротехнического оборудования от ЭМИ ЯВ, испытания этого оборудования на устойчивость к ЭМИ ЯВ, оценки эффективности средств защиты.

В книге использованы многочисленные документы и фотографии с грифами секретности, которые были рассекречены и стали общедоступными лишь недавно. По широте охвата проблемы, новизне, глубине и практической значимости описанных технических решений книга является фактически энциклопедией ЭМИ ЯВ и не имеет аналогов на книжном рынке.

Книга рассчитана на инженеров-электриков и энергетиков разрабатывающих, проектирующих и эксплуатирующих электронное и электротехническое оборудование, а также будет полезна преподавателям вузов и студентам. Много интересного найдут в ней также и любители истории техники.

Заказать книгу можно на сайте издательства [www.infra-e.ru](http://www.infra-e.ru) или по электронной почте [infra-e@yandex.ru](mailto:infra-e@yandex.ru) и телефону 8 (8172) 75-15-54