

На правах рукописи



**Кучак Сергей Викторович**

**СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ  
ЭЛЕКТРО-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ  
И ЛИТИЙ-ИОННОГО НАКОПИТЕЛЯ  
С УЛУЧШЕННЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель	<b>Харитонов Сергей Александрович</b> доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты	<b>Давидов Альбер Оганезович</b> доктор технических наук, старший научный сотрудник, Общество с ограниченной ответственностью «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», г. Москва, научно-конструкторский отдел, начальник;  <b>Семенов Валерий Дмитриевич</b> кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск, кафедра «Промышленной электроники», профессор.
Ведущая организация	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Защита состоится «22» апреля 2021 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» марта 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Максим Александрович Дыбко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одним из основных векторов развития современной энергетики является внедрение распределённой энергетики, в которой важное место занимают возобновляемые источники электроэнергии. По данным Международного энергетического агентства, с каждым годом доля фотовольтаической, ветряной и гидроэнергетики становится все более существенной в общем объеме генерируемой электрической энергии. В то время, как относительный среднегодовой прирост генерируемой мощности от невозобновляемых источников электрической энергии (НВИЭ) с каждым пятилетием снижается и в 2015 году составил не более 2 %, аналогичный параметр для электростанций на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) (гидро-, ветро-, геотермальные, приливные, а также фотовольтаические и тепловые солнечные электрические станции) увеличился на 6 %. Стоит отметить, что среди перечисленных ВИЭ наибольшие среднегодовые темпы роста генерируемых мощностей имеют фотовольтаические (135 %) и тепловые (96 %) солнечные электростанции, а также ветроэлектростанции (29 %). К 2015 году доля энергии, вырабатываемой за счет возобновляемых источников энергии достигла более 21 %, из них 4,5 % – от энергии солнца и ветра, что в абсолютном значении составляет более 239 тыс. и 144 тыс. ГВт·ч соответственно.

Важным достоинством возобновляемой энергетики является возможность организации автономного электроснабжения, что является актуальным для большинства территорий, расположенных на достаточном удалении от централизованной энергосистемы. В свою очередь, данным системам присущи такие недостатки, как ограничение по максимальной величине генерируемой мощности, а также неравномерность генерации в зависимости от внешних условий среды. В связи с этим, для обеспечения резервирования в таких системах электроснабжения используют дополнительные источники, в частности, электрогенераторные установки (ЭГУ): дизель-генераторные (ДГУ), газопоршневые (ГПУ) и газо-турбинные (ГТУ) установки и другие.

Известно, что ЭГУ наиболее эффективно работают при нагрузке, близкой к номинальной. Длительная работа ЭГУ при нагрузке близкой к холостому ходу может привести к ухудшению ее параметров и даже выходу из строя. Так как в течение дня нагрузка может значительно изменяться, необходимо решать проблему

поддержания уровня загрузки ЭГУ в оптимальном диапазоне. Кроме того, необходимо решить проблему устойчивости работы ЭГУ при быстром сбросе или набросе нагрузки. К примеру, регламентированное время переходного процесса при набросе 100 % номинальной мощности ДГУ составляет 3 секунды, при этом отклонение напряжения может составлять  $\pm 20$  %. При резкопеременном характере нагрузки инерционность работы установки может привести к снижению ресурса ЭГУ и даже спровоцировать ее аварийный останов.

Влияние указанных недостатков систем электропитания от ВИЭ и ЭГУ может быть минимизировано введением системы накопления энергии (СНЭ) с соответствующими способами управления. В автономных системах электроснабжения СНЭ позволяют накапливать электрическую энергию в периоды низкого потребления и генерировать при дефиците мощностей генерации. Кроме того, использование СНЭ в качестве ограничителя скорости изменения мощности источника питания способно повысить стабильность и бесперебойность электроснабжения.

Обязательной частью СНЭ является накопительное устройство. Существуют различные типы накопителей: аккумуляторные, суперконденсаторные, маховиковые и прочее. В настоящее время одним из наиболее удобных способов накопить электрическую энергию остается применение электрохимических накопителей энергии – аккумуляторов. Преимуществами применения аккумуляторных батарей (АКБ) является отсутствие движущихся частей, масштабируемость, модульность. Среди различных типов АКБ литий-ионные аккумуляторы (далее – ЛИА) являются относительно новой и весьма перспективной технологией.

Одним из способов реализации СНЭ с аккумуляторным накопителем является последовательное подключение источника питания и нагрузки посредством двукратного преобразования (так называемая схема back-to-back). Данная схема обладает следующими достоинствами:

- не требуется обеспечение синхронизации работы источника питания и инвертора напряжения;

- источник питания может эксплуатироваться с частотой, отличной от частоты нагрузки. В некоторых случаях это позволяет повысить КПД системы в целом;

К недостаткам данной схемы можно отнести:

- потери электроэнергии вследствие двойного преобразования (на выпрямителе и инверторе);
- преобразователь напряжения и АКБ должны быть рассчитаны на максимальную мощность нагрузки, что влечет за собой увеличение стоимостных и массогабаритных показателей системы.

Другой реализацией системы электроснабжения является схема с параллельным подключением источника питания и СНЭ, сформированной на базе инвертора напряжения и аккумуляторной батареи. Преимуществами такой реализации является повышенное значение КПД и меньшая себестоимость за счет отсутствия одного звена преобразования энергии, поскольку инвертор способен работать в обратном режиме – режиме активного выпрямителя (в англоязычной литературе *Active Front End mode*). Кроме того, номинальная мощность как источника питания, так и СНЭ может быть меньше пиковой мощности нагрузки, что позволяет оптимизировать массогабаритные и удельные показатели системы электроснабжения. В то же время, существует определенная сложность в выборе оптимального режима работы и соответствующих параметров источника питания и СНЭ. Кроме того, необходимо обеспечить устойчивость работы системы, состоящей из двух генераторов конечной мощности, работающих на общую нагрузку в параллельном режиме.

Для потребителя, имеющего нагрузку резкопеременного характера, расположенную в удаленном регионе и эксплуатируемую в автономном режиме на протяжении продолжительного срока, повышение бесперебойности и стабильности электроснабжения, экономия топлива, ресурса двигателя и батареи, уменьшение габаритов и стоимости системы электроснабжения в целом являются преимущественными и весомыми параметрами системы. Исходя из этого, можно сделать вывод, что электро-генераторная установка, работающая параллельно с системой накопления энергии является актуальным решением для потребителей, находящихся вне системы централизованного электроснабжения, в частности, имеющие в качестве основного источника питания систему генерации электроэнергии на основе ВИЭ.

В связи с этим, вопросы разработки, моделирования, проектирования, а также эксплуатации систем накопления энергии, с каждым годом становятся все более актуальными. Разработкой и производством оборудования для промышленных систем накопления энергии на базе аккумуляторных батарей занимаются такие предприятия как «ABB», «Fluence», «Eaton», «Schneider Electric», «SMA», «СПТ», «СНЭ», «МикроАРТ». Решению схемотехнических и алгоритмических задач, применимых в СНЭ, разработке достоверных моделей гибридных систем электроснабжения, повышению энергоэффективности и надежности электротехнических комплексов с применением СНЭ посвящено достаточное количество научных работ зарубежных и отечественных ученых. Среди них следует отметить труды Ворошилова А.Н., Дыбко М.А., Зиновьева Г.С., Зырянова В.М., Жемерова Г.Г., Носа О.В., Штанга А.А., Щурова Н.И., Харитонов С.А., *Akagi H., Aredes M., Kanazawa Y., Lawrance W. B., Nabaе A., Nayar C. V.* и др.

Как отмечено ранее, стабильность работы электро-генераторных установок определяется как максимально допустимой мощностью, так и скоростью нарастания ее величины. Несмотря на высокое быстродействие современных систем управления, большинство существующих способов управления инвертором напряжения в составе СНЭ имеют своей целью фиксацию установившегося значения мощности. При этом остается не решенной проблема совместной работы систем накопления энергии совместно с электро-генераторными установками в условиях резкопеременной нагрузки, пиковые значения мощности которой сопоставимы с номинальной мощностью ЭГУ, в частности повышение стабильности частоты и амплитуды напряжения на выходе генератора в момент коммутации нагрузки.

**Целью диссертационной работы является** улучшение качества электрической энергии в системе электроснабжения на базе электро-генераторной установки при резкопеременной нагрузке путем применения системы накопления энергии с предложенными параметрами и способами управления.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ особенностей эксплуатации аккумуляторных СНЭ, на основе которого сформировать требования к их структуре;

- исследовать функционирование аккумуляторного элемента в различных режимах и определить параметры его схемы замещения и математической модели на примере литий-железо-фосфатного аккумулятора;
- определить параметры переходных процессов при работе ЭГУ на резкопеременную нагрузку, сформировать имитационную модель ЭГУ, отражающую данный режим работы;
- разработать способ управления инвертором напряжения в составе исследуемой системы электроснабжения в режиме резкопеременной нагрузки;
- сформировать имитационную модель системы электроснабжения в целом, исследовать особенности работы при работе с разработанными способами управления;
- провести экспериментальные испытания вновь разработанных способов управления с целью подтверждения результатов имитационного моделирования.

**Объект и предмет исследования.** *Объектом исследования* является система электроснабжения на основе дизель-генераторной установки и аккумуляторного накопителя электрической энергии с инвертором напряжения. *Предметом исследования* являются такие параметры электрических процессов как длительность и характер переходного процесса, а также амплитуда колебаний напряжения и частоты при различных режимах работы системы.

#### **Научная новизна полученных результатов:**

1. Установлена зависимость напряжения в звене постоянного тока трехфазного мостового инвертора от максимальной мощности и  $\cos\varphi$  нагрузки, кратности частоты коммутации силовых ключей и частного коэффициента гармоник тока на частоте коммутации.
2. Установлены зависимости величины параметров схемы замещения процессов концентрационной поляризации  $LiFePO_4$  аккумулятора большой ёмкости от силы тока, определяющие параметры переходных процессов при набросе мощности на аккумулятор.
3. Разработаны способы управления инвертором напряжения, позволяющие регулировать скорость изменения мощности на выходе источника питания при неизменном профиле нагрузки.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем:

1. Сформирована методика определения минимальной величины напряжения в звене постоянного тока инвертора напряжения и максимальной индуктивности буферного реактора, обеспечивающая с точностью до 5 % задание величины максимальной мощности на выходе накопителя с известной величиной косинуса угла нагрузки и с точностью не более 4 % – задание частного коэффициента пульсации тока на частоте коммутации, вносящего существенный вклад в полный коэффициент гармоник.

2. Разработана верифицированная компьютерная модель дизель-генераторной установки, представляющая с погрешностью не более 2 % пиковые значения колебаний напряжения и частоты в режиме резкопеременной нагрузки с величиной перепадов мощности равной 60 % от номинальной мощности ДГУ.

3. Определены параметры схемы замещения  $LiFePO_4$  аккумулятора большой ёмкости, характеризующие с погрешностью не более 2 % импульсный режим разряда аккумулятора.

4. Сформированы способы управления инвертором напряжения, позволяющие регулировать скорость изменения мощности на выходе источника питания при неизменном профиле нагрузки.

Результаты диссертационного исследования использованы при составлении инструкции по эксплуатации  $LiFePO_4$  аккумуляторов ООО «Лиотех» (г. Новосибирск), а также при проектировании аккумуляторных батарей и накопителей электрической энергии на основе данных аккумуляторов.

Предложенный способ управления реализован в системе управления инвертором напряжения при разработке опытных образцов систем накопления энергии номинальной мощностью 100 и 1200 кВА ООО «СНЭ» (г. Новосибирск).

#### **Методы исследования**

В работе использованы методы математического и имитационного моделирования, методы управления сложными объектами с использованием ПИ-регуляторов и математического описания работы устройства, лабораторные и экспериментальные испытания разработанных технических решений. Имитационное моделирование проводилось в среде *PSIM*.



**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Представленная методика оценки параметров элементов системы накопления энергии в зависимости от величины максимальной мощности,  $\cos\varphi$  нагрузки и частного коэффициента гармоник тока на частоте коммутации позволяет определить с допустимой точностью требуемую индуктивность буферного реактора инвертора напряжения и число элементов аккумуляторной батареи.

2. Предложенные параметры схемы замещения литий-ионного аккумулятора большой ёмкости соответствуют импульсному и длительному разряду реального объекта.

3. Разработанная компьютерная модель дизель-генераторной установки отражает работу реального объекта в режиме резкопеременной нагрузки.

4. Разработанные способы управления инвертором напряжения в составе системы электроснабжения улучшают динамические свойства системы электроснабжения на основе электро-генераторной установки за счет снижения перепадов по частоте и амплитуде напряжения на ее выходе (теоретически до пренебрежимо малых величин).

**Достоверность результатов** подтверждается корректностью применяемого математического аппарата и методов математического моделирования, сходимостью результатов вычислительных и натурных экспериментов.

**Апробация исследований** проведена в рамках следующих мероприятий:

1. VIII и X Всероссийские научные конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2014, НТИ-2016), Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск;

2. 53-ая Международная научная студенческая конференция МНСК-2015, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск;

3. 15-ая, 16-ая, 17-ая, 18-ая Международные конференции молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам (EDM 2014 – 2017 г.г.), Новосибирский государственный технический университет, СОК «Эрлагол», Республика Алтай;

4. 21-ая Международные конференции молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам (2020 г.), Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск.

## **Публикации**

Основные положения по теме исследования представлены в 15 печатных работах, 2 из которых в ведущих журналах, рекомендованных списком ВАК, 9 – в журналах и трудах научных конференций, индексируемых в международных базах *Web of Science* и/или *Scopus*, а также 2 патента на изобретение РФ.

## **Личный вклад автора**

Автор непосредственно принимал участие в составлении программы и методики проведения комплексного исследования характеристик литий-ионных аккумуляторов, а также в анализе полученных характеристик. Участвовал в испытаниях дизель-генераторной установки и обработке полученных результатов. Предложил и разработал модели дизель-генераторной установки и литий-ионного аккумулятора, а также способ линейного изменения составляющих мгновенной мощности генератора. Участвовал в испытаниях опытных образцов системы накопления энергии функционирующей совместно с дизель-генераторной и газо-поршневой установками, а также в анализе полученных характеристик.

## **Соответствие паспорту специальности**

Исследования, выполненные в диссертационной работе, соответствуют формуле и пунктам 1, 3, 4 паспорта специальности 05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы»: 1) Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем; 3) Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления; 4) Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, 3 приложений. Она содержит 138 страниц основного текста, 81 рисунок, 15 таблиц, библиографический список из 75 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, описаны методы исследований, изложены сведения о научной новизне и практической значимости, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведены результаты анализа принципов построения систем автономного электроснабжения в различных сферах применения, основными источниками питания в которых являются возобновляемые источники энергии. Показано, что в качестве резервных источников наиболее часто используются электро-генераторные установки, в частности дизель-генераторные установки. Отмечена необходимость применения в подобных системах аккумуляторных систем накопления энергии (СНЭ). Проведен обзор возможных режимов работы СНЭ в системе электроснабжения, представлен способ управления инвертором напряжения, основанный на преобразовании Парка-Горева и теории мгновенной мощности Акаги (*H. Akagi*).

На основании выбранной структуры СНЭ, предложена методика определения параметров схемы, таких как максимальная индуктивность буферного реактора и минимальное среднее значение напряжения в звене постоянного тока инвертора напряжения, обеспечивающих генерацию мощности с заданной величиной полной мощности и соотношением активной и реактивной составляющих мощности.

**Во второй главе** на примере литий-железо-фосфатных аккумуляторов (далее ЛИА) рассмотрены особенности функционирования электро-химических накопителей электрической энергии в различных режимах работы.

Представлены результаты комплексного исследования параметров ЛИА большой ёмкости (от 300 А·ч), получены следующие характеристики:

- зависимость напряжения разомкнутой цепи (далее – НРЦ) от состояния заряда (англ. *state of charge*) (далее *SoC*);
- зарядная характеристика при различных уровнях напряжения заряда;
- разрядная характеристика при различных уровнях тока разряда;
- зависимость напряжения ЛИА при импульсных токах разряда.

На основании реакции ЛИА на импульсные разряды определена возможность описания кривой изменения напряжения при помощи суммы двух экспонент и постоянной составляющей, что позволяет перейти к известной схеме замещения.

На Рисунке 1 представлена выбранная принципиальная схема замещения аккумулятора. Здесь  $U_{OCV}$  – напряжение разомкнутой цепи (НРЦ);  $R_{int}$  – внутреннее омическое сопротивление постоянному току;  $C_{PA}$ ,  $R_{PA}$  – ёмкость и сопротивление активационной поляризации соответственно,  $C_{PC}$ ,  $R_{PC}$  – ёмкость и сопротивление концентрационной поляризации соответственно,  $U_T$  – напряжение на выводах элемента.

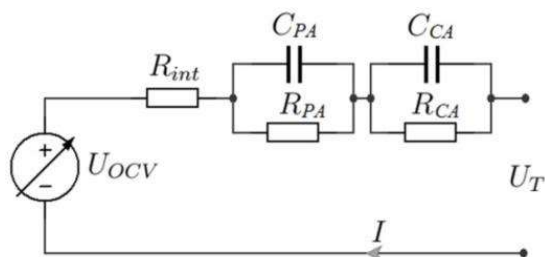


Рисунок 1 – Электротехническая схема замещения аккумулятора

Для выбранной схемы замещения получены значения ее элементов. Выявлена зависимость величины сопротивления и ёмкости звена концентрационной поляризации от силы разрядного тока. В среде *PSIM* сформирована имитационная модель, при помощи которой получены результаты, соответствующие экспериментальным данным.

**В третьей главе** рассмотрены основные соотношения, описывающие функционирование ДГУ как наиболее часто используемого типа ЭГУ. Представлены результаты исследования параметров переходного процесса при работе дизель-генераторной электрической станции средней мощности в условиях резкопеременной нагрузки. Выявлено, что длительность переходного процесса и величина перепада по частоте напряжения при набросе мощности больше соответствующего параметра при сбросе.

В результате анализа сформирована структура и схема имитационной модели в среде *PSIM*, представленная на Рисунке 2. Модель представляет собой синхронную машину СМ в качестве генератора и управляемый источник крутящего момента ЭМП в качестве привода. Для обеспечения контроля над величиной выходного напряжения в качестве сигналов обратной связи для системы управления возбуждением  $СУ_U$  используются действующее значение линейного напряжения  $U_{l(rms)}$ . В систему управления  $СУ_n$ , отвечающую за регулирование частоты вращения вала генератора  $n$ , введены две ветви системы управления, оснащенные фильтрами нижних частот, обеспечивающими заданную инерционность при соответствующем

перепаде мощности. Контроль над мощностью осуществляется следящей системой БКР, определяющей её величину  $P_{out}$  и направление перепадов (*minus/plus*), на основании чего осуществляется подключение соответствующей ветви системы управления. Разработанная модель позволяет получить требуемую длительность и характер переходного процесса по частоте и амплитуде генерируемого напряжения. Величина расхождения по данным параметрам составила не более 1 %, что говорит о высокой сходимости полученных результатов.

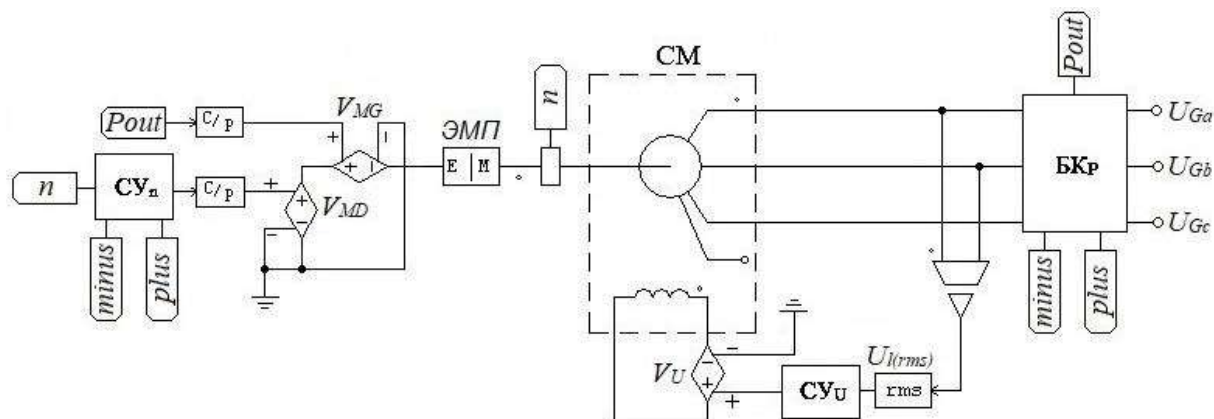


Рисунок 2 – Структурная схема реализации модели ДГУ

В четвертой главе представлена имитационная модель системы электроснабжения в целом в среде *PSIM*, изображенная на Рисунке 3. В ее состав входят модель ДГУ, представленная на Рисунке 2, блок коммутации преобразователя БКП, блок регулируемой нагрузки БРН, инвертор напряжения ИНВ с аккумуляторной батареей АБ, буферным реактором БР, емкостными фильтрами звена переменного  $C_{\phi}$  и постоянного тока  $C_{\phi(dc)}$ , а также блоком предварительного заряда емкости БПЗ с блоком задержки БЗ. С помощью данной модели исследована работа системы электроснабжения в различных режимах работы СНЭ: ограничение активной, реактивной и полной мощности на выходе генератора. Для имитационного моделирования всех режимов результаты для коэффициента модуляции при расчетной максимальной мощности  $M$  ( $S_{ImaxРАСЧ}$ ) показали погрешность не более 0,4 %, что говорит высокой степени соответствия моделирования и результатов, полученных в Главе 1. Погрешность при оценке частного коэффициента гармоник тока на частоте пульсации  $K_{Г1}(f_S)$  составила не более 7 % от требуемого значения, что в абсолютном значении составляет не более 0,41 %, что также отражает высокую степень соответствия результатов.

Сформулированы требования к способу управления инвертором напряжения в составе СНЭ, работающей совместно с генератором в режиме резкопеременной

нагрузки. Сформированы структуры системы управления, позволяющие при неизменном профиле нагрузки снизить скорость изменения мощности на генераторной установке по экспоненциальному и линейному закону. Временные диаграммы, полученные в среде *PSIM* для модели системы электроснабжения при введении СНЭ с разработанными способами управления, представлены на Рисунке 4.

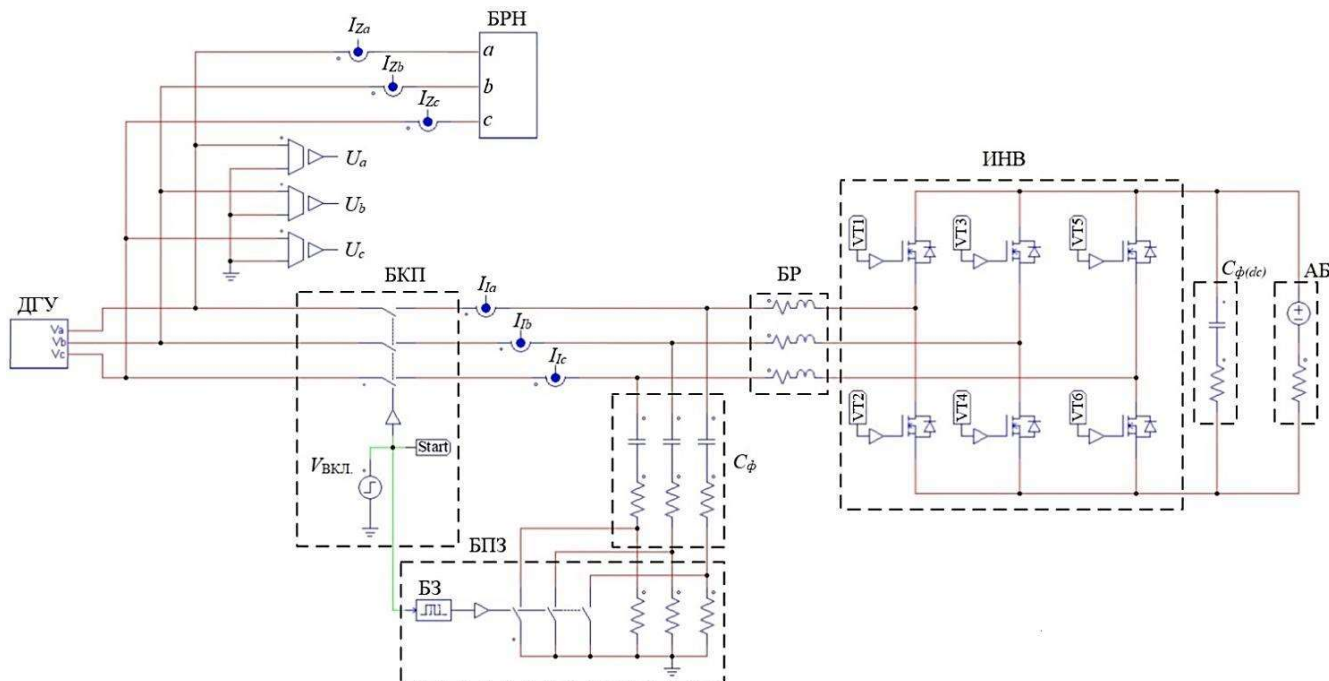


Рисунок 3 – Имитационная модель силовой схемы системы электроснабжения

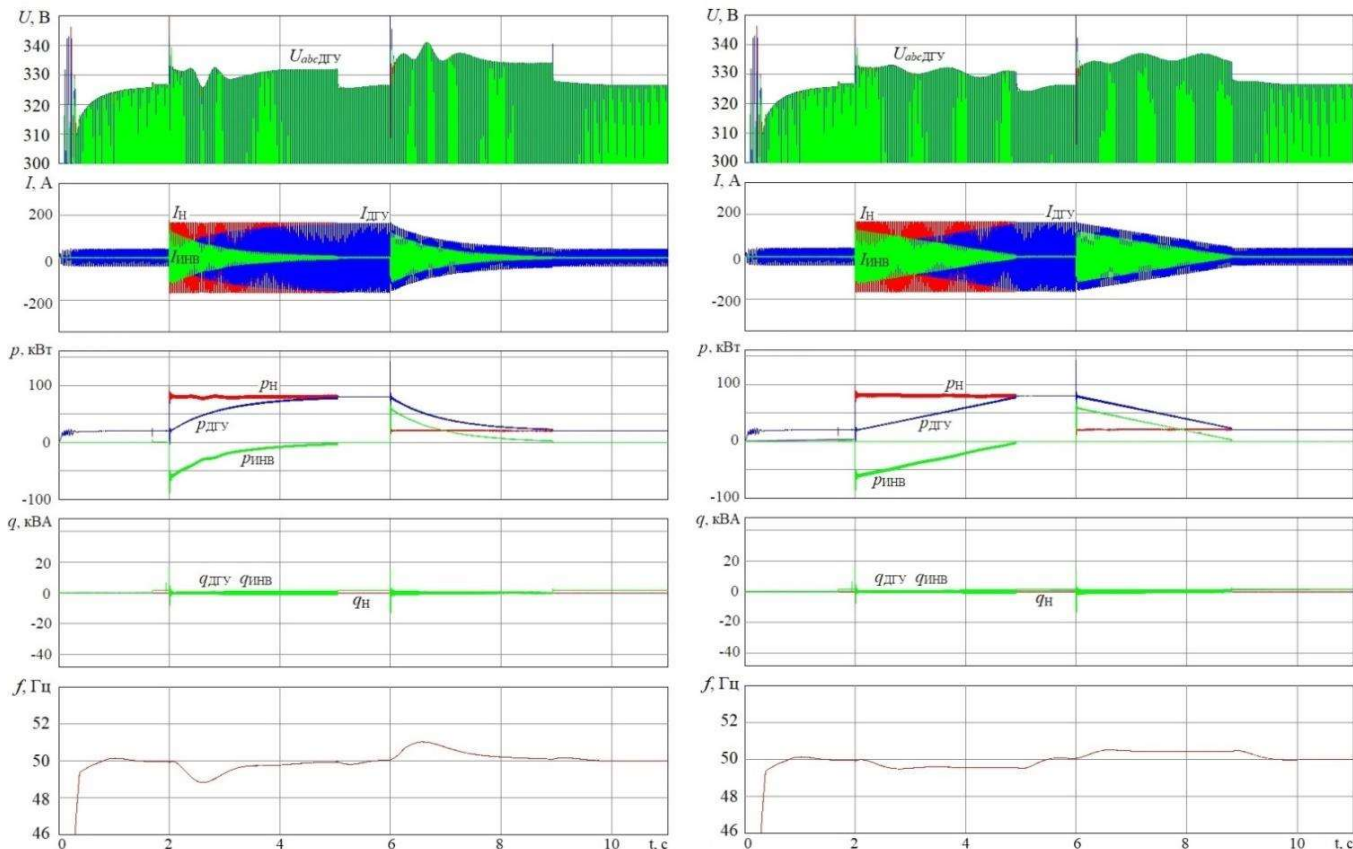


Рисунок 4 – Результаты моделирования системы электроснабжения в режиме экспоненциального (слева) и линейного (справа) ограничения скорости изменения выходной мощности генератора

Произведен сравнительный анализ полученных результатов. Показано, что при одинаковой длительности переходного процесса введение разработанных способов показали 3,6- и 7,5-кратное уменьшение перепадов по частоте напряжения и 5,8- и 8,1-кратное уменьшение перепадов по амплитудному значению напряжения на нагрузке соответственно.

**В пятой главе** представлены результаты экспериментального исследования опытных образцов системы накопления энергии номинальной мощностью 100 и 1200 кВА, предназначенные для совместной работы в различных режимах с дизель-генераторной (ДГУ) и газо-поршневой установкой (ГПУ) соответственно.

На Рисунке 5 представлены временные диаграммы, отражающие работу СНЭ мощностью 100 кВА в режиме экспоненциального ограничения скорости изменения выходной мощности генератора. В Таблице 1 представлено сравнение результатов, полученных при сбросах и набросах 60 % от номинальной мощности дизель-генераторной установки в режиме работы ДГУ без системы накопления энергии и при ее подключении в режиме экспоненциального ограничения скорости изменения мощности на выходе генератора. Полученные результаты подтверждают эффективность применения разработанных способов управления инвертором напряжения при работе ДГУ в условиях резкопеременной нагрузки.

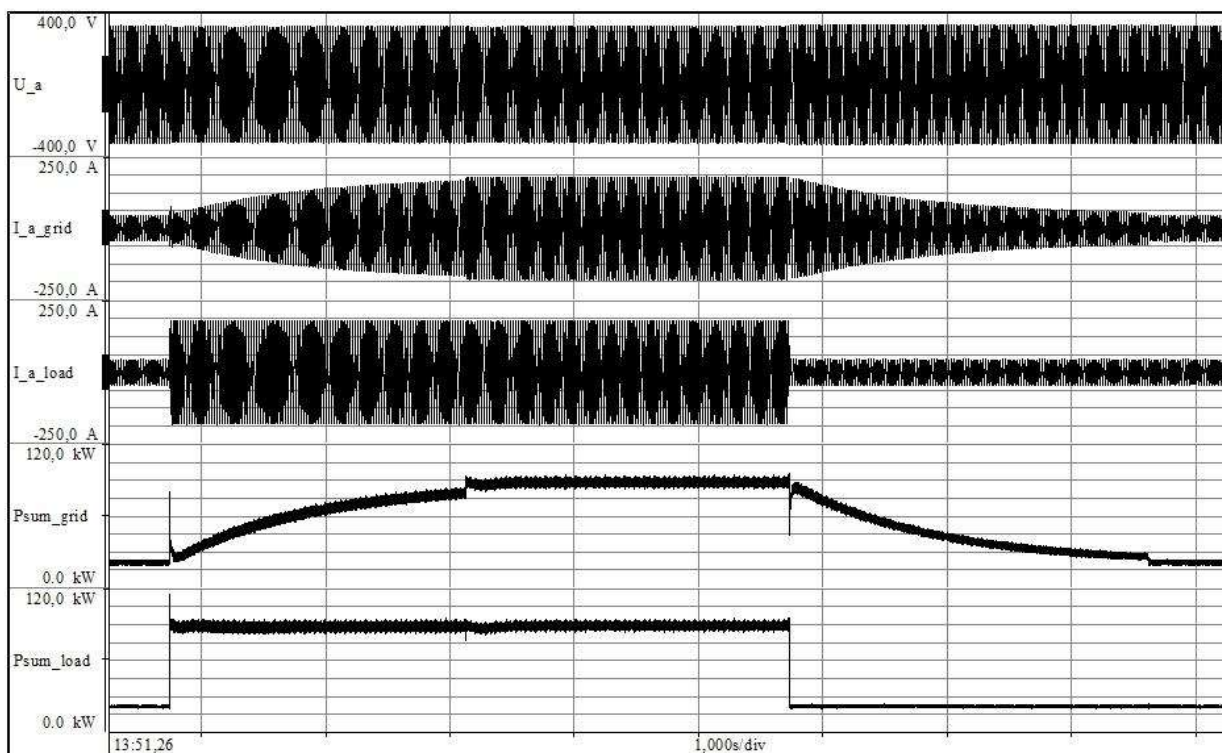


Рисунок 5 – Осциллограммы переходного процесс при набросе/сбросе мощности на ДГУ при совместной работе со СНЭ 100 кВА в режиме ограничения скорости изменения выходной мощности генератора

Таблица 1 – Сравнение режимов работы

Параметр	ДГУ	ДГУ + СНЭ ( $dP/dt$ )
Просадка амплитуды напряжения при набросе, В (% от среднего)	30,73 (9,31)	7,82 (2,37)
Скачок амплитуды напряжения при сбросе, В (% от среднего)	31,99 (9,69)	13,01 (3,94)
Просадка частоты при набросе, В (% от среднего)	3,79 (7,58)	1,52 (3,04)
Скачок частоты при сбросе, В (% от среднего)	3,67 (7,34)	1,71 (3,42)
Длительность переходного процесса при набросе, с	2,5	4,2
Длительность переходного процесса при сбросе, с	1,0	3,6

Аналогичные диаграммы работы газо-поршневой установки совместно с системой накопления энергии мощностью 1200 кВА представлены на Рисунке 6. На представленных результатах максимальная величина перепадов мощности нагрузки составляла 750 кВт, что составляет более 60 % от номинальной мощности ГПУ (при допустимых перепадах  $\pm 20$  %). Максимальный перепад частоты составил при этом 1,5 Гц, что говорит о высокой эффективности предложенного способа управления.

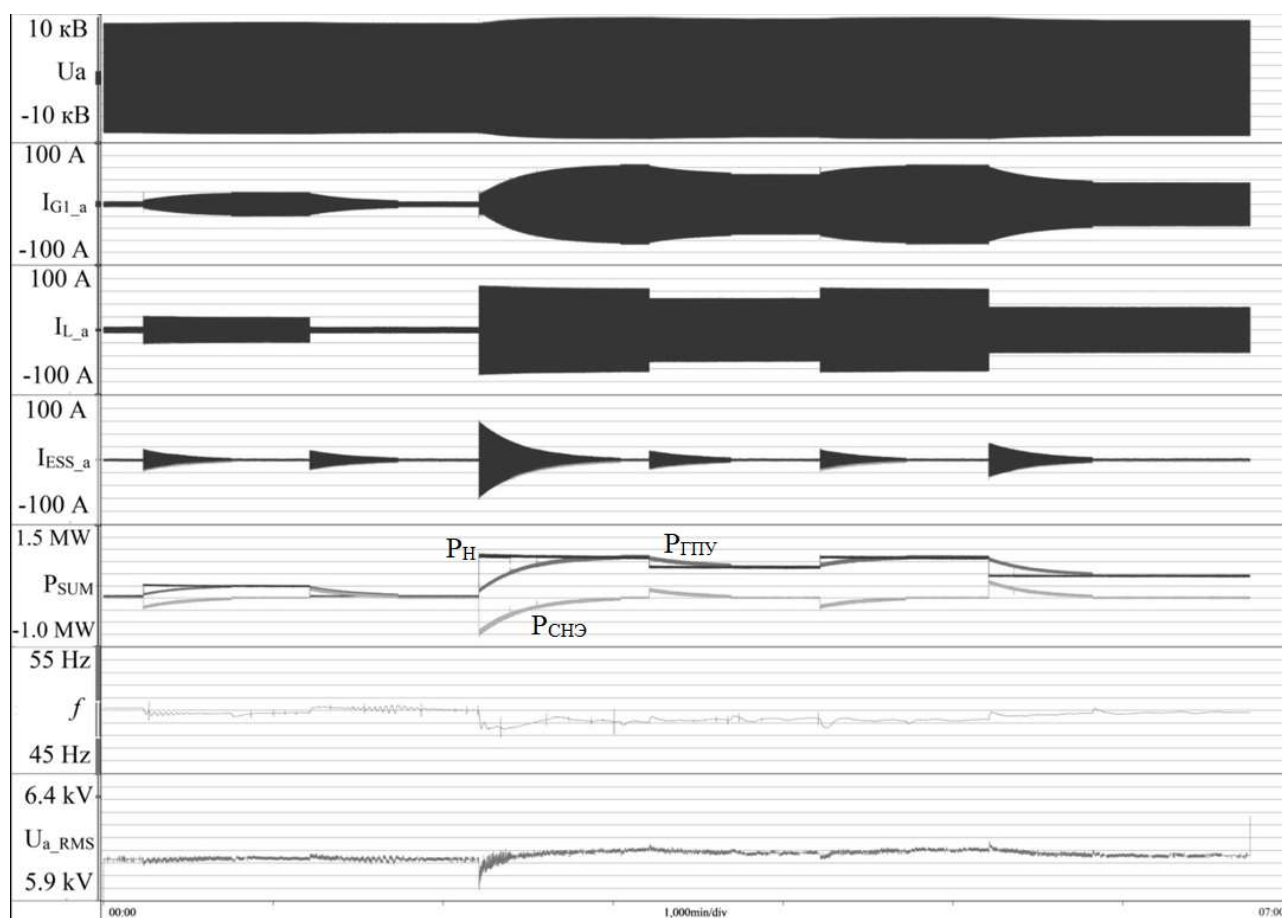


Рисунок 6 – Осциллограммы переходного процесс при набросе/сбросе мощности на ГПУ при совместной работе со СНЭ 1200 кВА в режиме ограничения скорости изменения выходной мощности генератора



## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе выполнения диссертационного исследования решена актуальная научно-практическая проблема по повышению динамических характеристик системы электроснабжения на основе электро-генераторной установки и системы накопления энергии с литий-ионной аккумуляторной батареей в части обеспечения требуемого характера и длительности переходного процесса в условиях резкопеременной нагрузки. К основным результатам работы являются:

1. Обоснована необходимость использования аккумуляторных систем накопления энергии (СНЭ) в системах автономного электроснабжения в различных сферах применения. Представлен способ управления инвертором напряжения для формирования различных режимов работы СНЭ, а также сформирована методика определения минимальных параметров инвертора напряжения, обеспечивающих генерацию мощности с заданными характеристиками.

2. Получен ряд основных характеристик и диаграмм, отражающих функционирование литий-железо-фосфатного аккумулятора большой ёмкости в различных режимах, определены параметры элементов схемы замещения. Сформирована имитационная модель, при помощи которой получены результаты, соответствующие экспериментальным данным погрешность не более 2 % на 90 % от диапазона степени заряда аккумулятора.

3. Сформирована имитационная модель электро-генераторной установки в условиях резкопеременной нагрузки, позволяющая получить требуемый характер переходного процесса, значения перепадов по частоте и амплитуде генерируемого напряжения которого имеют погрешность не более 2 %.

4. Предложены два способа управления инвертором напряжения в составе СНЭ, позволяющие снизить скорость нарастания мощности на генераторной установке при неизменном профиле нагрузки: с экспоненциальным и линейным ограничением скорости нарастания выходной мощности генератора.

5. Сформирована имитационная модель исследуемой системы электроснабжения при введении разработанных способов управления инвертором напряжения. Анализ полученных результатов показал преимущество способа управления с линейным ограничением скорости нарастания выходной мощности генератора перед экспоненциальным ограничением за счет уменьшения величины

колебаний амплитудного значения и частоты напряжения на выходе генератора на более чем 40 и 100 % соответственно.

6. Получены результаты экспериментального исследования опытных образцов системы накопления энергии номинальной мощностью 100 и 1200 кВА, предназначенный для совместной работы с дизель-генераторной и газо-поршневой установкой соответственно в режиме резкопеременной нагрузки. Проведенные исследования подтвердили эффективность применения способов ограничения скорости нарастания выходной мощности генератора на реальных объектах.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК:*

1. Кучак, С.В. Моделирование режима импульсного разряда литий-ионного аккумулятора / С.В. Кучак // Доклады АН ВШ РФ, 2018 – № 2 (39) – С. 62 –69;

2. Зырянов, В. М. Экспериментальные исследования и испытания совместной работы системы накопления энергии и ДГУ в составе автономной энергосистемы / В. М. Зырянов, С. В. Кучак, П. А. Бачурин, С. А. Харитонов // Промышленная энергетика. - 2018. - № 10 - С. 2-10.

*Патенты на изобретения РФ:*

3. Способ управления инвертором напряжения в системах бесперебойного питания и системах накопления электрической энергии при резкопеременной нагрузке / С.А. Харитонов, П.В. Перетятыко, С.В. Кучак, П.А. Бачурин // пат. 2697262 Рос. Федерация. № 2018119777; заявл. 29.05.2018; опубл. 13.08.2019, Бюл. № 23;

4. Способ управления инвертором напряжения в системах накопления электрической энергии при резкопеременной нагрузке / С.А. Харитонов, С.В. Кучак, П.А. Бачурин // пат. 2733999 Рос. Федерация. № 2020106291; заявл. 11.02.2020; опубл. 09.10.2020, Бюл. № 28.

*Статьи в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus / WebOfScience:*

5. Voroshilov, A. N. Diesel Generator Set Working in Parallel with Electrical Energy Storage System / A. N. Voroshilov, A. I. Khristolubova, A. A. Khristolubov, S. V. Kuchak // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies

and Electron Devices EDM 2013: Conference Proceedings – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2013 – p. 288-292;

6. Kuchak, S.V. Autonomic Power Supply System Based on Diesel Generator Set and Storage of Electrical Energy from Li-ion Battery / S. V. Kuchak // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014: Conference Proceedings – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2014, P. 408-410;

7. Kuchak, S.V. Investigation of the lithium-ion battery characteristics / S. V. Kuchak, E.F. Kuchak, A.S. Semyagin // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference Proceedings – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2015 – pp. 433 – 435;

8. Kuchak, S.V. Charge characteristics of lithium-ion accumulators under different voltages / S. V. Kuchak, A.N. Voroshilov // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Conference Proceedings – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2016, pp. 484 – 485;

9. Kuchak, S.V. Discharge Characteristics of Lithium-Ion Accumulators under Different Currents / S. V. Kuchak, A. N. Voroshilov, E. A. Chudinov // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017: Conference Proceedings – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2017, pp. 435 – 438;

10. Dybko M. A. Load Leveling for a Diesel Generator Using an Energy Storage and Instantaneous Power Theory / Maksim A. Dybko, Sergey V. Kuchak, Petr A. Bachurin, Sergey V. Brovanov, Sergey A. Kharitonov // Proceedings of 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM-2018, June 29 - July 3, Altay Republic, Erlagol, pp. 567-573;

11. Bachurin, P. A. Mathematical model of the energy storage system in the power system / P. A. Bachurin, V. M. Zyryanov, N. G. Kiryanova, S. V. Kuchak, G. B. Nesterenko, G. A. Prankevich [et al.] // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018) : тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. : в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 5. – С. 41–47;

12. Kuchak, S. V. Calculation of Energy Storage System Parameters / S. V. Kuchak, P. A. Bachurin, S. A. Kharitonov// 2020 21st International Conference of Young

Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), June 29 - July 3 2020, Chemal, Russia, pp. 379-383.

13. Nesterenko, G. An experimental study of combined operation of energy storage system and gas engine power plant in off-grid power system / G. Nesterenko, G. Prankevich, A. Savitskiy, D. Gladkov, V. Zyryanov, S. Kuchak, J. Mokrousova // E3S Web of Conferences ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management, 209, 03020, 2020.

*Другие публикации по теме диссертации:*

14. Кучак, С. В. Разрядные характеристики литий-ионных аккумуляторов при малых токах разряда / С. В. Кучак, С.А. Харитонов // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов в 9 ч. / под ред. М.А. Дыбко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Часть 6. – С. 11-12;

15. Бачурин, П.А. Испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10-1200-400 при совместной работе с ГПУ в составе экспериментальной энергосистемы / Бачурин П.А., Gladkov Д.С., Zyryanov В.М., Кучак С.В., [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение, № 2 (59), март-апрель 2020. – С.18-25.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383) 346-08-57

Формат 60x84 1/16. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № 228. Подписано в печать 18.02.2021 г.