

УДК 621.3

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СГЛАЖИВАНИЯ ПИКОВ НАГРУЗКИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ ГРАВИ- ТАЦИОННОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ С АДАПТИВНЫМ АЛГО- РИТМОМ УПРАВЛЕНИЯ**

Сугак В.В., студент гр. 6ЭЭТ-233, III курс

Зубков М.А., студент гр. 6ЭЭТ-233, III курс

Научный руководитель: Черных Т.Е., старший преподаватель

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

**Аннотация:** В статье рассматривается проблема повышения энергоэффективности распределительных электрических сетей путем сглаживания пиков нагрузки с использованием гравитационных накопителей энергии. Традиционные методы управления накопителями, основанные на жестких логических алгоритмах, не учитывают стохастический характер потребления и динамику изменения цен на электроэнергию. Предложен адаптивный алгоритм управления зарядом/разрядом гравитационного накопителя, реализованный на языке Python, который в режиме реального времени анализирует текущую нагрузку сети и прогнозирует оптимальные моменты аккумуляции и генерации. Приведены результаты имитационного моделирования, демонстрирующие снижение пиковой мощности на 12-15% и повышение коэффициента использования установленной мощности трансформатора. Показано, что предложенный подход позволяет не только улучшить технические показатели работы сети, но и обеспечить экономический эффект за счет снижения стоимости покупки энергии в часы пиковых нагрузок.

**Ключевые слова:** гравитационный накопитель энергии, сглаживание пиков нагрузки, адаптивное управление, энергоэффективность, распределительные сети, Python, имитационное моделирование, оптимизация режимов.

**Введение.** Современные распределительные электрические сети сталкиваются с проблемой неравномерности графиков нагрузки, характеризующейся наличием утренних и вечерних пиков потребления. Данная неравномерность приводит к недоиспользованию пропускной способности линий электропередачи и трансформаторного оборудования в периоды провалов нагрузки и рискам перегрузок в часы максимума. Традиционным решением проблемы является увеличение установленной мощности трансформаторов и усиление сетевой инфраструктуры, что требует значительных капитальных затрат.

Альтернативным подходом является применение накопителей энергии, позволяющих аккумулировать электроэнергию в периоды низкого спроса (провалов нагрузки) и отдавать ее в сеть в часы пик [1, 2]. В работе [3] показано, что использование гибридных электростанций совместно с накопителями

энергии позволяет существенно повысить стабильность энергосистемы и эффективность использования возобновляемых источников энергии. Среди различных типов накопителей гравитационные системы привлекают внимание исследователей благодаря экологичности, длительному сроку службы и отсутствию деградации материала, характерной для химических источников тока [4]. Принцип действия таких систем основан на преобразовании электрической энергии в потенциальную при подъеме массивного груза и обратной генерации при его опускании.

Вопросы практической реализации гравитационных накопителей рассматривались в [5], где выполнены расчеты основных параметров и проанализированы аспекты их внедрения в существующую энергосистему. Разработка математической модели гравитационного аккумулятора для сглаживания пиковых нагрузок представлена в [6], где обоснована принципиальная возможность использования таких устройств в распределительных сетях.

Однако эффективность применения гравитационных накопителей критическим образом зависит от алгоритмов управления процессом заряда и разряда. Большинство существующих решений используют простые пороговые алгоритмы (накопление при превышении мощности потребления заданного уровня и генерацию при снижении ниже другого порога). Такой подход не учитывает прогнозируемый характер нагрузки, динамику цен на электроэнергию на оптовом рынке и текущее состояние заряда накопителя, что снижает потенциальную эффективность его применения. Настоящее исследование развивает ранее выполненные работы [3, 5, 6] и направлено на создание адаптивного алгоритма управления, повышающего эффективность сглаживания пиковых нагрузок.

*Целью настоящей работы* является разработка и исследование адаптивного алгоритма управления гравитационным накопителем энергии, обеспечивающего повышение эффективности сглаживания пиков нагрузки в распределительной сети за счет учета прогнозируемых значений потребления и оптимизации моментов включения режимов заряда и разряда. В качестве инструмента реализации алгоритма используется язык программирования Python, позволяющий обрабатывать временные ряды данных и принимать решения в масштабе времени, близком к реальному.

#### *Результаты исследования.*

Для верификации эффективности предложенного подхода было проведено имитационное моделирование работы участка распределительной сети в течение 2 суток с дискретностью 15 минут. Сравнивались три сценария: работа сети без накопителя, работа с традиционным пороговым управлением и работа с разработанным адаптивным алгоритмом. Для моделирования были приняты следующие исходные данные: номинальная мощность трансформатора (принимаем 400 кВА при коэффициенте мощности 0,9, что соответствует 360 кВт активной мощности), мощность гравитационного накопителя (80 кВт), емкость (300 кВт·ч), КПД (90%).

Моделирование было реализовано на языке Python. В ходе исследования моделировалась текущая нагрузка, время суток и состояние заряда накопителя.

Схема работы заключается исследовании пиковых нагрузок в разное время, так например, выполнялся анализ разряда аккумулятора в утренние часы (с 7:00 до 11:00) и вечерние часы (с 17:00 до 22:00), эти часы соответствуют времени пиковых нагрузок на сеть, когда потребители включают максимум приборов, для обеспечения собственных нужд. Также выполняется анализ потребления в ночное время (с 23:00 до 6:00) и умеренные нагрузки в дневные часы, когда людей нет дома. Для выполнения численных расчетов были использованы библиотеки NumPy, а для визуализации результатов моделирования - библиотека Matplotlib.

На рис. 1 представлены суточные графики нагрузки для вышеперечисленных сценариев работы. На графике черного цвета представлена базовая нагрузка. Здесь отчетливо видны утренние скачки потребления электроэнергии в районе 9 часов утра и вечерние пиковые нагрузки (около 19 часов), которые могут достигать порядка 364 кВт. Синей пунктирной линией обозначен график порогового управления, который показывает снижение пиковых значений нагрузки до уровня 319 кВт. Красная же сплошная линия на графике обозначает адаптивное управление. Именно она показывает наилучший результат. Здесь пиковые значения нагрузки снижаются до 315 кВт. Из графика видно, что в часы пиковых нагрузок, когда максимум потребителей включены в сеть, при использовании адаптивных алгоритмов аккумулятор разряжается больше всего, а в ночные часы, когда потребители электроэнергии не используют электричество, наоборот, аккумулятор активно запасает энергию.

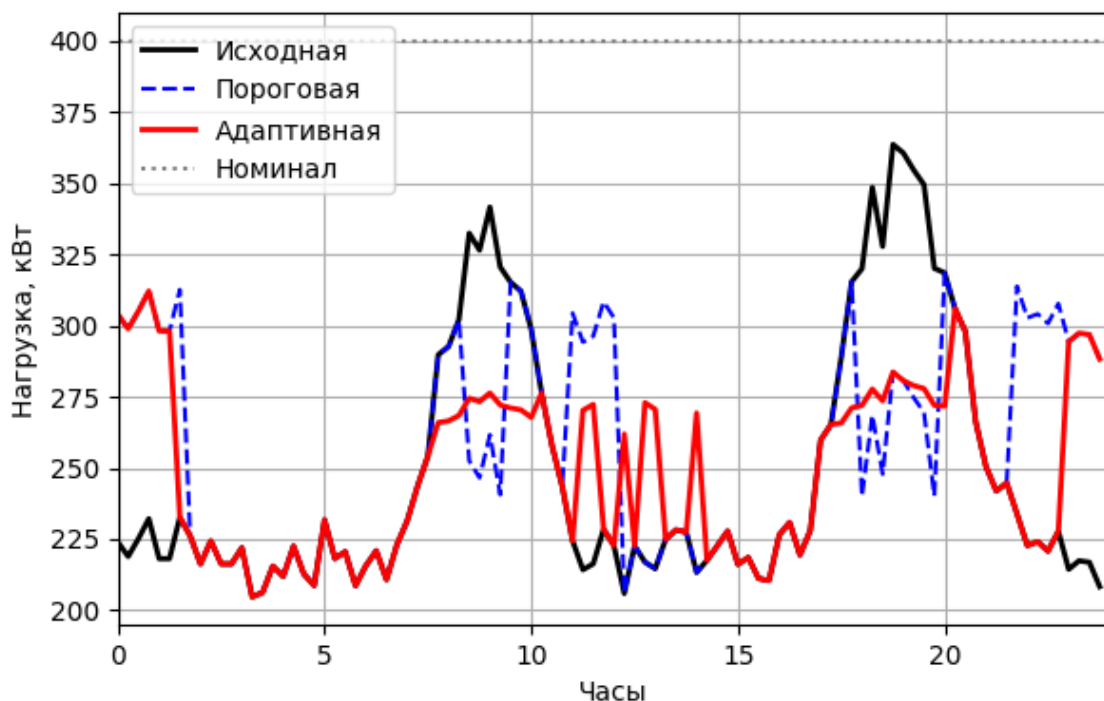


Рис.1. Суточные графики нагрузки

На рис. 2 представлены графики заряда гравитационного аккумулятора энергии. График синего цвета, выполненный пунктирной линией, отображает

процессы при пороговом управлении. Он символизирует классический пример, в котором средний уровень заряда составляет порядка 80,3%

Зеленая кривая линия показывает процессы при адаптивном управлении. Это график демонстрирует более гибкие динамические переходы, чем при использовании порогового метода. При адаптивном управлении средний заряд аккумулятора составляет 61,0%, так как при таком управлении наблюдаются глубокие разряды в часы пиковых нагрузок на сеть, но при всем этом в ночное время аккумулятор способен зарядиться полностью. Исходя из анализа можно сделать выводы, что адаптивный алгоритм гораздо эффективнее использует доступную емкость для сглаживания пиковых нагрузок в сети.

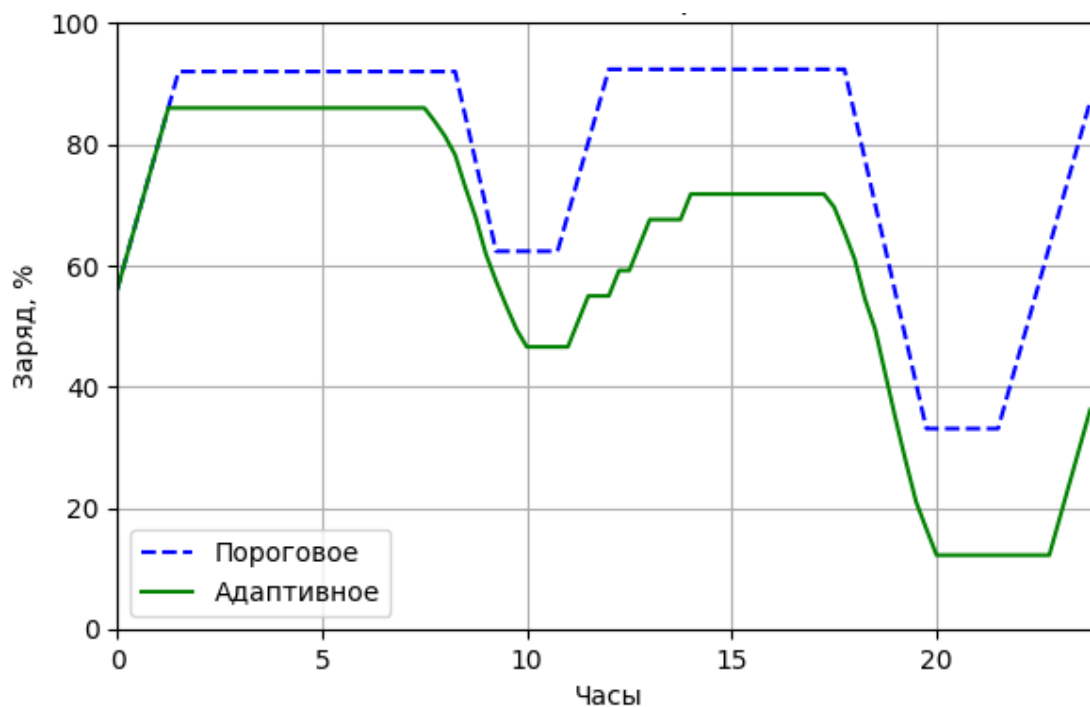


Рис.2. Состояние заряда накопителя

На рис. 3 приведена столбчатая сравнительная диаграмма пиковых нагрузок. Она показывает максимальное пиковое значение (черный столбец). При пороговом управлении нагрузка составляет 319 кВт, а при адаптивном управлении - 315 кВт. График, изображенный зеленой пунктирной линией, обозначает предельно-допустимую активную мощность трансформатора, которая равна 360 кВт. Активная мощность трансформатора рассчитывается исходя из его полной мощности. Нужно отметить, что исходная нагрузка (см. рис. 3), превышает допустимую активную мощность трансформатора, что несомненно может создать риск перегрузки. Поэтому применение гравитационного аккумулятора может компенсировать пиковые нагрузки, и снизить их до безопасного уровня, который достигается при адаптивном управлении, что позволяет полностью минимизировать риск перегрузки оборудования.

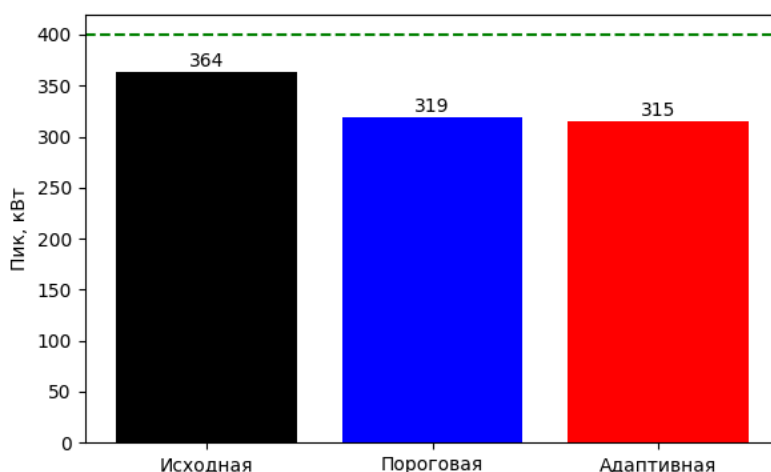


Рис. 3. Сравнение пиковых нагрузок при разных условиях работы

На рис. 4 продемонстрировано сравнение эффективности использования разных методов управления. Так при адаптивном управлении снижение пиковых нагрузок, как видно из рисунка, происходит эффективнее, чем при пороговом управлении. Это подтверждает эффективность предложенного алгоритма для рассматриваемой задачи.

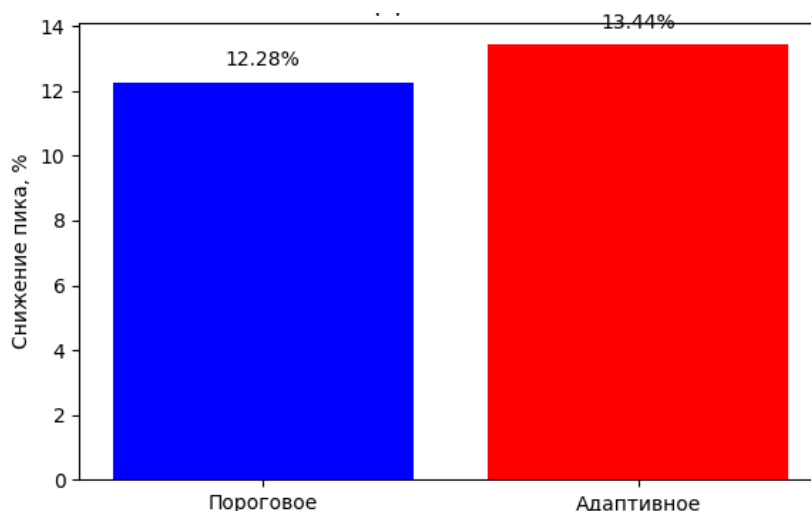


Рис. 4. Сравнение эффективности методов управления

Представленный анализ распределения нагрузки показал, что адаптивный способ управления позволяет снизить пиковые значения нагрузки, что положительно влияет на ее дисперсию, и в свою очередь благоприятно сказывается на режимах работы оборудования и позволяет снизить потери в линиях электропередач.

Из всего вышеизложенного можно сделать следующие выводы. Использование гравитационных аккумуляторов в распределительных электрических сетях является вполне эффективным инструментом для сглаживания пиковых нагрузок в сети. Алгоритм, который был разработан, позволяет учитывать изменение времени суток, текущей нагрузки и состояния заряда аккумулятора. Также он способен повышать эффективность сглаживания скачков нагрузки

примерно на 1,16%. Программа, написанная на языке Python, является вполне работоспособной. Она может быть адаптирована под конкретные параметры накопителя энергии и характеристики сети.

Предложенный в статье метод может быть адаптирован и для других типов накопителей энергии. Для достижения экономического эффекта такого подхода можно достичь за счет снижения стоимости электроэнергии в моменты максимальной нагрузки на сеть, а также за счет уменьшения потерь в сети.

### Список литературы

1. Гусев Ю.П. Разработка усовершенствованной методики выбора параметров и мест размещения систем накопления электроэнергии в распределительных электрических сетях / Гусев Ю.П., Субботин П.В. // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. 2019, vol. 19, no. 2, pp. 48–61
2. Савина Н.В. Накопители электрической энергии как средство повышения надёжности и экономичности функционирования электрической сети / Н.В. Савина, Л.Н. Лисогурская, И.А. Лисогурский // Международный научно-исследовательский журнал. №2 (92). 2020. URL: <https://research-journal.org/archive/2-92-2020-february/nakopiteli-elektricheskoy-energii-kak-sredstvo-povysheniya-nadyozhnosti-i-ekonomichnosti-funkcionirovaniya-elektricheskoy-seti>
3. Сугак В.В. Анализ использования гибридных электростанций для стабилизации энергосистемы / МОЛОДАЯ МЫСЛЬ - развитию энергетики»: Сборник трудов БрГУ «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири - 2025» [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», г. Братск, 2025. С 7-11
4. Терехов Я.С. Перспективы развития гравитационной энергетики / Я.С. Терехов, В.В. Сугак, М.А. Зубков, Т.Е. Черных // Прикладные задачи энергетики, электротехники и автоматики: Труды Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2024, с. 152-156.
5. Сугак В.В. Расчет и практические аспекты внедрения гравитационного аккумулятора / Россия молодая: Сборник материалов XVII Всерос. научно-практической конференции с международным участием, 22-25 апр. 2025 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева» – Кемерово, 2025. с. 21019.1 – 21019.6
6. Сугак В.В. Разработка модели гравитационного аккумулятора для сглаживания пиковых нагрузок в электросетях / Научная опора Воронежской области: Сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий / Воронеж, 2025. С. 271-273