Химический состав подземных вод – гидрокарбонатно-кальциевый. Минерализация 405–428 мг/л (стабильнее, чем у поверхностных в 8–10 раз); жесткость 8,4–9,3 ммоль/л (очень жесткая). Содержание $Fe_{общ}$ в летний период достигает 0,24–0,30 мг/л – вблизи ПДК 0,3 мг/л, что требует контроля на водозаборах. Нитраты не превышают 2,3 мг/л (ПДК = 45 мг/л). Растворенный кислород в межпластовых водах < 0,8 мг/л – восстановительная среда.

Таблица 2

Сезонные характеристики подземных вод Гомельской области, 2025 г.

Показатель	Зима	Весна	Лето	Осень
Глубина залегания Q_4, м	1,10–1,20	1,35–2,40	1,72–2,38	1,22–1,55
Глубина залегания Pg, м	3,44–3,48	3,50–3,90	3,68–3,82	3,46–3,58
Минерализация, мг/л	418–422	405–418	420–428	415–420
Жесткость, ммоль/л	8,8–9,0	8,4–8,6	9,0–9,3	8,7–8,9
$Fe_{общ}$, мг/л	0,17–0,20	0,20–0,25	0,24–0,30	0,18–0,22

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Расход р. Сож в апреле 2025 г. (1 140 $м^3$/с) превысил среднемноголетнее значение на 4 %; температура воды в июле (23,1 °С) – на 0,3 °С выше нормы, отражая региональный тренд потепления.

2. Качество поверхностных вод в зимне-осенний период соответствует I–II классу; в июле–августе – II–III классу по показателям $БПК_5$ и мутности. Нарушений рыбохозяйственных нормативов по DO не зафиксировано.

3. Уровень грунтовых вод Q_4 изменяется с амплитудой 1,28 м; межпластовые и артезианские воды стабильны (0,46 м и 0,06 м соответственно). Содержание Fe в летний период приближается к ПДК в 18 % скважин – необходим усиленный контроль.

4. Минерализация поверхностных вод (188–312 мг/л) в 1,5–2,0 раза ниже, чем подземных (405–428 мг/л). Сезонная стабильность химического состава подземных вод подтверждает их надежность как источника хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Литература

1. Ежегодник качества поверхностных вод РБ за 2025 г. — Минск : Белгидромет, 2025.
2. Мониторинг подземных вод РБ / РУП «Белгеология». — Минск, 2025.
3. Государственный водный кадастр РБ. — Минск : Белгидромет, 2024.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ БЕЛАРУСИ И ВЫБОР ИХ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

К. В. Грицкова, Н. С. Махов

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Научный руководитель Д. А. Секацкий

Рассмотрена проблема выравнивания графиков нагрузки и предложен метод использования кинетических накопителей энергии. Приведен расчет и анализ использования предложенного метода в условиях смоделированного грузового терминала.

Ключевые слова: выравнивание графика нагрузки, кинетические накопители энергии, грузовой терминал, рекуперация, энергоэффективные технологии.

Современная энергетическая отрасль уделяет особое внимание проблеме выравнивания графиков нагрузки различных потребителей. Это позволяет снизить необходимую выработку электроэнергии для снижения потребления удельного топлива, излишних расходов на простой оборудования и увеличения надежности работы за счет возможной компенсации пиков потребления. Этим вопросом занимаются как предприятия электрической сети, так и крупные промышленные потребители. В данной работе будет представлен метод использования кинетических накопителей энергии.

Для анализа и дальнейших расчетов будет рассмотрен терминал, смоделированный на основе ТЛЦ «Колядичи» и «Орша-Восточная» [1]. Грузовой участок состоит из пяти кранов, три из которых («1»–«3») имеют грузоподъемность 36 т и максимальную номинальную мощность 380 кВт. Кран «1» обслуживает второй путь, используемый при высокой загруженности терминала, краны «2», «3» занимаются погрузкой составов первого пути. Кран «4» с грузоподъемностью 40 т и кран «5» с грузоподъемностью 55 т обслуживают третий путь и имеют максимальную номинальную мощностью 400 и 440 кВт соответственно. В качестве груза рассматривается два типа транспортных контейнеров стандарта ISO 668 длиной 20 и 40 футов с максимальной загрузкой брутто 30480 кг. Условный операционный цикл грузового крана длится 8 минут и разбивается на интервалы в 2 минуты, его составляющие представлены в таблице.

Условный операционный цикл козлового крана

Номер операции	Наименование операции	Длительность, мин
1	Подъем груза	2
2	Перемещение контейнера	2
3	Опускание груза	2
4	Ожидание	2

В данной работе рассматривается конфигурация КНЭ в виде готовых модулей промышленного производства [2] с установленной максимальной мощностью 600 или 300 кВт и емкостью 4 кВт · ч. Внутри такого модуля смонтирована вакуумная камера с маховиком, генератор и необходимая программируемая автоматика. Для потребителей, требующих большей емкости, модули можно объединять в группы. Исходя из приведенного цикла работы крана, рассчитывается целевое время отдачи мощности, по которому находится целевая мощность компенсации, и далее необходимый для выбора модулей параметр – оптимальная мощность отдачи КНЭ. Модули выбираются так, чтобы на каждом кране их емкость отдачи соответствовала оптимальному значению. В результате расчета для кранов «1»–«4» необходимо установить по два накопителя энергии, для крана «5» – три модуля.

Таким образом, ключевыми параметрами подбора и настройки накопительной системы являются значения целевой мощности компенсации и максимальной мощности зарядки накопителей. Целевая мощность компенсации $P_{\text{цел}}$ – это условный уровень потребления мощности из сети, к которому система накопления стремится привести потребление парка в моменты пиковой его нагрузки. В практическом расчете данная величина определена как некоторая часть от максимальной номинальной мощности крана:

$$P_{\text{цел}} = k_{\text{цел}} P_{\text{ном}}^{\max},$$

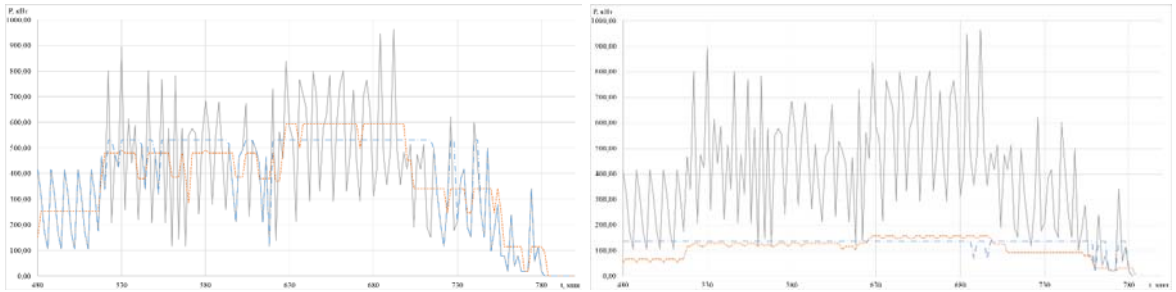
где $k_{\text{цел}}$ – коэффициент целевой мощности.

Значение целевой мощности напрямую определяет необходимую пиковую отдачу КНЭ, а также общую емкость модулей. При слишком малой выбранной $P_{\text{цел}}$ в периоды продолжительной высокой нагрузки накопители не смогут полностью восстанавливать уровень запасенной энергии между пиками потребления, что приведет к неполной компенсации либо полному отсутствию сглаживания. Слишком большое же значение целевой мощности не позволит полным образом реализовать всю запасенную в КНЭ энергию, а также оставит большое пространство для «просадки» потребления в моменты, когда краны осуществляют менее энергоемкие операции. Для рассматриваемого грузового терминала и выбранной конфигурации оборудования оптимальным значением коэффициента целевой мощности определено $k_{\text{цел}} = 0{,}3$.

Параметр максимальной мощности зарядки накопителей $P_{\text{зар}}^{\max}$ определяет максимальную мощность, которую система КНЭ может забирать из сети в моменты зарядки. Данная величина наиболее важна при использовании КНЭ с кранами без рекуперации энергии, поскольку в таком случае вся мощность зарядки забирается из сети. Слишком большая $P_{\text{зар}}^{\max}$, в сумме с потреблением самих кранов, может оказаться соразмерной или даже больше целевой мощности компенсации, что негативно скажется на равномерности итогового графика нагрузки. Слишком же маленькая мощность зарядки будет препятствовать восполнению запаса энергии КНЭ, что потребует установки большего числа накопительных модулей. Другим немаловажным фактором являются технические ограничения самого модуля КНЭ, согласно которым максимальная мощность зарядки составляет 80 % от максимальной мощности отдачи модуля. На основании данных требований было определено, что оптимальным значением $P_{\text{зар}}^{\max}$ для рассматриваемого цикла работы крана является разность между целевой мощностью компенсации $P_{\text{цел}}$ и потреблением крана в режиме ожидания $P_{\text{ожид}}^{\max}$:

$$P_{\text{зар}}^{\max} = P_{\text{цел}} P_{\text{ожид}}^{\max}.$$

После определения всех параметров и настройки оптимального режима компенсации, конфигурация системы с отдельными КНЭ для каждого потребителя позволяет снизить пиковую суммарную нагрузку на 39% (рис. 1, *а*).



а) *б*)

Рис. 1. Графики суммарной нагрузки грузового терминала:
а – график нагрузки без рекуперации; *б* – график нагрузки с использованием рекуперации (сплошная линия – нагрузка без использования накопителей, пунктирная – с отдельными КНЭ, штрихпунктирная – с общей системой накопления)

Определенный интерес представляет возможность установки общей системы КНЭ большей мощности на общую шину всех потребителей [3]. В рассматриваемом случае применение такой конфигурации требует увеличения максимальной мощности отдачи установки до 900 кВт, что достигается комбинированием модулей по 600 и 300 кВт. Оптимальное значение целевой мощности компенсации, как и в случае с конфигурацией из отдельных КНЭ, может сильно отличаться в зависимости от параметров конкретного графика нагрузок. В данном случае оно составило $k_{\text{цел}} = 0{,}55$. Из этого необходимое количество модулей $N_{\text{КНЭ}} = 11$, что соответствует суммарному количеству модулей при их отдельной установке.

Полученный график нагрузки (рис. 1, *а*), кроме более высокой, по сравнению со случаем отдельной установки, целевой мощности компенсации, имеет также значительно большую неравномерность. Ввиду этого можно сделать вывод о нецелесообразности применения конфигурации с общим накопителем для систем без рекуперации энергии.

Использование технологии рекуперации в последние годы находит все более широкое применение во всех подъемных механизмах. В современных моделях кранов режим рекуперации при опускании груза способен «возвратить» в сеть свыше 80% энергии, потраченной на его подъем. В данной работе именно это значение определяет мощность рекуперации крана:

$$P_{\text{рекуп}} = 0{,}8P_{\text{под}}.$$

Очевидно, что при условии наличия накопителей достаточной емкости, рекуперация энергии позволит применить еще более низкий коэффициент целевой мощности. В рассматриваемом случае для такого режима оптимальным оказалось значение $k_{\text{цел}}^{\text{рекуп}} = 0{,}08$. Разумеется, такой коэффициент требует установки дополнительного оборудования [2]: по три модуля КНЭ для кранов «1»–«4», и четыре модуля для крана «5», а также увеличения максимальной мощности отдачи КНЭ до 600 кВт. Однако данные нововведения позволят уменьшить пиковое потребление терминала на 84 %, и существенно выровнять весь суточный график.

Использование общей системы КНЭ вместо отдельных модулей в случае с применением рекуперации показывает значительно лучший результат: при использовании всего 8-ми модулей (против 16-ти в случае отдельной установки) с максимальной мощностью отдачи 900 кВт и выбранным коэффициентом целевой мощности $k_{\text{цел}}^{\text{рекуп}} = 0{,}14$ полученный график нагрузки (рис. 1, *б*) имеет вид горизонтальной прямой с несколькими «провалами» в потреблении.

Таким образом, разработанная в ходе исследования методика позволяет относительно просто определить оптимальную конфигурацию и параметры систем кинетических накопителей энергии для заданной группы потребителей, а также рассмотреть различные варианты установки. На основании полученных для используемой модели данных можно заключить, что в системах без рекуперации энергии более рационально устанавливать отдельные КНЭ на линии потребителей (полученный график имеет коэффициент заполнения $k_{\text{зап}} = 0{,}51$), в то время как при использовании рекуперации общая система накопителей оказывается более эффективной как по количеству оборудования, так и по качеству сглаживания ($k_{\text{зап}}^{\text{рекуп}} = 0{,}73$).

Литература

1. Силивонов, Е. А. Обеспечение устойчивого обслуживания грузовых районов станции Колядичи / Е. А. Силивонов // Тихомировские чтения : материалы междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 20–21 окт. 2022 г. / Белорус. гос. ун-т транспорта ; редкол.: А. А. Ерофеев (отв. ред.) [и др.]. – Гомель, 2023. – С 278–282.
2. Collins, Ted. Flywheel Energy Storage / Ted Collins, Steven A. Parker // Federal Technology Alert / U. S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy. – 2023. – N DOE/EE-0286. – 16 p.
3. Novel load forecasting and optimal dispatching methods considering demand response for integrated port energy system / Ruoli Tang [et al.] // J. of Marine Science and Engineering. – 2025. – Vol. 13. – N 3/421. – 26 p.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ПО ВЕЛИЧИНЕ СОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ИЗОЛЯТОРАХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

А. Н. Лесота, Д. А. Карпейчик, Я. А. Субоч, Н. С. Макаренко

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Научный руководитель Д. А. Секацкий

Массовые аварии на линиях воздушных электропередач (ЛЭП) в зимний период 2025–2026 гг. показали энергетической отрасли Республики Беларусь необходимость учета фактора солевых отложений на изоляторах. Наибольший ущерб получили линии, расположенные вблизи крупных магистралей и МКАДа. Все это из-за активной обработки дорог противогололедными реагентами на основе хлорида натрия и кальция. Соль, вступая в реакцию вместе с частичками бетона, пыли и сажи, оседает на изоляторах [1]. Вследствие этого на изоляторах ЛЭП образуется плотная корка, которая создает токопроводящие пути. Предлагаемое решение – снижение аварийных ситуаций в зимний период на линиях электропередач в Беларуси путем внедрения мониторинга солевых отложений на изоляторах; расчет и прогнозирование времени эксплуатации изоляторов с помощью математической модели тока утечки.

Ключевые слова: солевое загрязнение изолятора, мониторинг солевых отложений, математическая модель тока утечки, нормальный изолятор, загрязненный изолятор.

Для решения данной проблемы был произведен расчет токов утечки для нормального и загрязненного изоляторов. В качестве основного изолятора был выбран ПС-70Е, представленный на рис. 1.

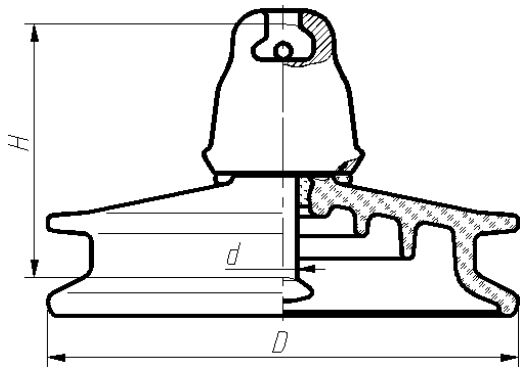


Рис. 1. Стеклянный двухкрылатый изолятор ПС-70Е