

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2149>

**Н. Т. Рустамов¹, *О. Д. Меирбекова², А. Н. Бергузинов³,
Б. С. Мухаммадиев⁴, А. Г. Калтаев⁵**

^{1,2}Международный казахско-турецкий университет

имени Ходжи Ахмеда Ясави, Республика Казахстан, г. Туркестан;

^{3,5}Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;

⁴Джизакский политехнический институт,

Республика Узбекистан, г. Джиззак.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6437-6600>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0949-1443>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6954-8259>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9143-7854>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1684-3347>

*e-mail: oksana_120183@mail.ru

НАКОПЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Сегодня уже не секрет, что с развитием энергетических систем, в структуре которых преобладают возобновляемые источники энергии, становится особенно актуальным применение эффективных систем накопления энергии. В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с накоплением электрической энергии, вырабатываемой ветроустановками и солнечными панелями, объединёнными в кольцевую микросеть. Предлагается использование автоколебательного LC-контура в качестве альтернативного динамического метода накопления электроэнергии. При этом автоколебательный контур подключается к шине микросети параллельно, что позволяет не только компенсировать колебания мощности, но и обеспечивает кратковременное накопление. Такой подход способствует повышению устойчивости работы микросети и улучшению качества электроэнергии при переменной генерации. Приводятся расчёты, подтверждающие возможность динамического накопления электрической энергии посредством автоколебательного контура, а также анализируются условия устойчивости автоколебаний, добротность LC-цепи и влияние

паразитных параметров на эффективность хранения. Кроме того, рассматриваются особенности интеграции автоколебательных контуров в распределённые энергосистемы и их потенциальное применение в автономных и гибридных энергокомплексах с высокой долей ВИЭ. Показано, что предложенный метод может рассматриваться как вспомогательное средство повышения надёжности и устойчивости микросетей без использования традиционных электрохимических накопителей. Полученные результаты подтверждают перспективность применения автоколебательных LC-контуров в системах распределённой генерации с переменной нагрузкой и генерацией.

Ключевые слова. Микросеть, кольцевая шина, динамическое накопление, колебательный контур, параллельное подключение.

Введение

Сегодня уже не вызывает сомнений, что в условиях стремительного развития технологических процессов и устойчивого роста потребления энергии ключевым направлением современного электроэнергетического комплекса является повышение эффективности распределённого хранения и использования электрической энергии [1; 2]. Современные энергетические системы сталкиваются с рядом вызовов, обусловленных широким внедрением распределённой генерации на основе возобновляемых источников энергии, которые в силу своей переменности и непредсказуемости становятся одним из основных факторов возникновения нестабильных режимов в электрических сетях и микросетях [3].

В данной связи возрастает необходимость применения систем распределённого накопления электроэнергии, обеспечивающих повышение надёжности, устойчивости и гибкости функционирования энергетической инфраструктуры [4]. Системы распределённого накопления представляют собой технические комплексы, предназначенные для аккумуляирования электрической энергии с последующим её высвобождением в периоды дефицита генерации либо повышенной нагрузки. Их интеграция в распределённые энергосистемы позволяет значительно улучшить качество электроснабжения, сгладить колебания мощности, компенсировать кратковременные отклонения выработки ВИЭ, а также повысить общую синхронность работы элементов энергосети [5; 6].

Распределённое накопление энергии является ключевым элементом перехода к новым энергетическим системам, основанным на солнечной, ветровой, малой гидравлической и других видах генерации на базе

возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Сегодня темпы развития технологий накопления опережают рост самих ВИЭ, поскольку именно системы накопления позволяют обеспечивать стабильность, управляемость и прогнозируемость распределённой генерации. Требования в области экологической безопасности и стимулирование низкоуглеродного развития приводят к последовательному увеличению доли ВИЭ, главным образом ветровой и солнечной энергии, в структуре энергосистемы [7].

Ветровая и солнечная энергия остаются ключевыми объектами исследований, поскольку современные распределённые энергосистемы наиболее активно ориентируются на интеграцию именно этих источников. Однако внедрение переменной генерации в существующие энергосети сопровождается снижением эффективности, нарушением режимов устойчивости и ростом требований к надёжности. Непостоянство выработки, резкие колебания нагрузки и погодозависимость создают необходимость применения компенсирующих механизмов.

Системы распределённого накопления энергии (СНЕ) способны смягчать негативные последствия, связанные с переменностью выработки ВИЭ [8]. СНЕ обеспечивают преобразование электрической энергии в другие формы для её последующего хранения и использования в периоды повышенного спроса или дефицита генерации. Интеграция таких систем повышает гибкость функционирования сети, позволяет осуществлять балансировку мощности и эффективно решает проблемы, обусловленные нестабильностью возобновляемых источников энергии [9].

Современные энергосистемы сталкиваются с серьёзными вызовами, связанными с интеграцией возобновляемых источников энергии и необходимостью гибкого, быстродействующего и эффективного хранения электрической энергии [10]. В условиях роста доли распределённой генерации накопители энергии становятся ключевым элементом обеспечения надёжности и устойчивости энергосистемы.

Традиционные методы накопления энергии, такие как аккумуляторные батареи, маховики и сверхпроводниковые магнитные накопители (SMES), обладают рядом существенных недостатков: высокой стоимостью, экологическими ограничениями, сложностью технического обслуживания и ограниченным ресурсом циклов «заряд–разряд». В связи с этим возрастает потребность в разработке новых технологических решений для распределённого хранения электрической энергии, обладающих повышенной надёжностью, длительным сроком службы и низкими эксплуатационными затратами.

Цель работы – разработка систем накопления электрической энергии на автоколебательном LC-контуре, параллельно подключенном к кольцевой

шине микросети, объединяющей ветроустановки и солнечные панели. Реализация такого подхода позволит компенсировать колебания генерации и обеспечить кратковременное накопление и высвобождение энергии в распределённой энергетической системе.

Материалы и методы

Будущее мирового рынка магнитных систем накопления энергии выглядит многообещающим благодаря растущему спросу на решения для аккумулирования энергии из возобновляемых источников. Согласно прогнозам, мировой рынок сверхпроводящих магнитных систем накопления энергии (SMES) будет расти среднегодовыми темпами 8,6 % в период с 2025 по 2031 год. Основными драйверами роста являются: увеличение инвестиций в инфраструктуру возобновляемой энергетики, повышение требований к качеству и надёжности электроэнергии, а также необходимость обеспечения стабильности работы сетей [11; 12]. Исходя из этих тенденций, можно ожидать дальнейшее развитие технологий накопления энергии.

В настоящей работе предлагается новый метод распределённого накопления энергии на автоколебательном LC-контуре. Анализ физики работы колебательного контура (рисунок 1) показывает, что подобное устройство способно аккумулировать электрическую энергию, обеспечивая эффективное временное хранение и возможность последующего использования в микросети.

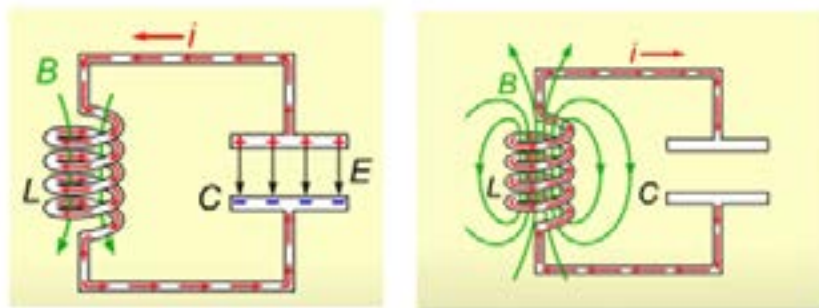


Рисунок 1 – Перераспределение энергии между конденсатором и катушкой в LC-контуре.

Распределённое накопление энергии здесь заключается в том, что энергия не хранится в одном фиксированном источнике (например, батарее), а циклически перераспределяется между электрическим полем конденсатора

и магнитным полем катушки индуктивности. В любой момент времени часть энергии находится в конденсаторе (в виде электрической энергии), а часть – в катушке индуктивности (в виде магнитной энергии). Это позволяет использовать контур для временного хранения энергии и её передачи в микросеть по мере необходимости, обеспечивая гибкость и распределённый характер накопления.

Общее количество энергии в контуре определяется суммой энергии, находящейся в конденсаторе и катушке:

$$W_{\text{общ}} = W_C + W_L = \frac{1}{2} C U^2 + \frac{1}{2} L I^2$$

где C – ёмкость конденсатора, U – напряжение на нём, L – индуктивность катушки, I – ток через катушку.

Максимальная энергия достигается, когда, например, конденсатор полностью заряжен ($U=U_{\text{max}}$), а ток через катушку ещё не пошёл ($I=0$):

$$W_{\text{max}} = \frac{1}{2} C U_{\text{max}}^2$$

или, если известно только максимальное значение тока в катушке:

$$W_{\text{max}} = \frac{1}{2} L I_{\text{max}}^2$$

где, U_{max} — максимальное напряжение на конденсаторе,

I_{max} – максимальный ток через катушку.

Например:

Синусоидальный ток в кольцевом контуре: $I_{\text{max}} = 5 \text{ А}$

Частота: $f = 100 \text{ кГц}$

Контур настроен в резонанс с этой частотой

Ёмкость: $C = 10 \text{ мкФ} = 10^{-5} \text{ Ф}$

Индуктивность: $L = 25.3 \text{ мкГн} = 2.53 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$

Максимальное напряжение на контуре: $U_{\text{max}} = 100 \text{ В}$

Добротность: $Q = 50$

Энергия, запасённая в контуре:

$$W = \frac{1}{2} C U^2 = 0,5 \cdot 10^{-5} \cdot (100)^2 = 0,05 \text{ Дж}$$

Эта энергия периодически перераспределяется между конденсатором и катушкой.

В резонансном контуре энергия теряется постепенно из-за потерь, связанных с сопротивлением контура. Добротность Q показывает, сколько циклов колебаний энергия «живет» прежде чем уменьшится в Q раз:

$$Q = 2\pi \cdot \frac{\text{Энергия, запасенная в контуре}}{\text{Энергия, рассеиваемая за цикл}}$$

Мощность потерь (и, соответственно, максимальная доступная мощность для нагрузки) определяется формулой:

$$P = \frac{W \cdot \omega}{Q}$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота.

Поставляем значения:

$$\omega = 2\pi \cdot 100 \cdot 10^3 \approx 6,283 \cdot 10^5 \text{ рад/с}$$

$$P = \frac{0,05 \cdot 6,283 \cdot 10^5}{50} \approx 628 \text{ Вт}$$

То есть, при резонансе и $Q = 50$ теоретически можно «снять» около 628Вт в короткий промежуток времени, пока энергия циркулирует в контуре.

Циркулирующая мощность контура на резонансной частоте рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{цпр}} = 2\pi f W = 2\pi \cdot 100,000 \cdot 0,05 \approx 31,4 \text{ Вт}$$

Однако это – мощность, которая колеблется в контуре, а не та, которую можно полностью снять. Реальная доступная выходная мощность учитывает добротность Q :

$$P_{\text{выход}} = \frac{P_{\text{вхр}}}{Q} = \frac{31.4}{50} \approx 0.63 \text{ Вт}$$

Таким образом, при $U=100$ В и $Q=50$ доступная мощность относительно невелика. Для увеличения выходной мощности можно:

- увеличить напряжение на контуре;
- уменьшить частоту для увеличения энергии на цикл;
- повысить добротность Q ;
- оптимально согласовать нагрузку и использовать внешнюю подпитку для компенсации потерь.

При этих условиях автоколебательный контур может эффективно хранить энергию и работать как часть генератора или передатчика, обеспечивая возможность циклического использования энергии в микросети (рисунок 2).

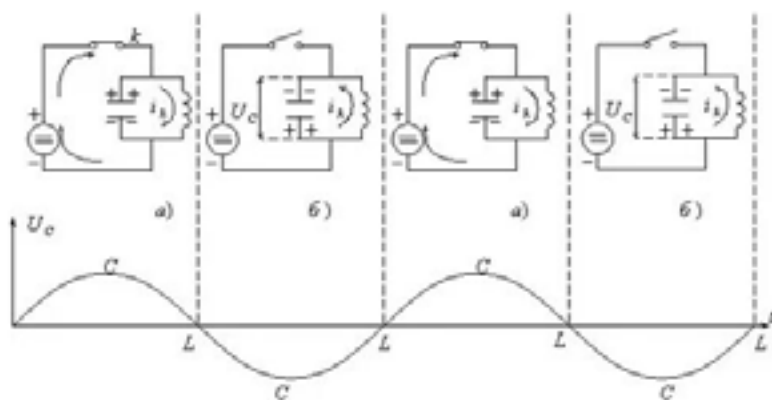


Рисунок 2 – Подпитка LC-контура источником постоянного напряжения (а) и снижение энергии после отключения источника (б).

Эту задачу можно решить с помощью создания в контуре незатухающих колебаний. Интересно, что подпитку контура следует осуществлять именно в моменты, когда убывает магнитное поле. Поскольку спад индуцированного тока сопровождается уменьшением магнитного потока, подпитка в этот момент позволяет поддерживать колебания. Такая синхронизация показана на рисунке 3.

Обозначения на рисунке:

- 1 – биполярный транзистор;
- 2 – индуктивный контур, управляющий открытием транзистора;
- 3 – автоколебательный контур (АКК);
- 4 – источник питания для подпитки колебательного контура электроэнергией.

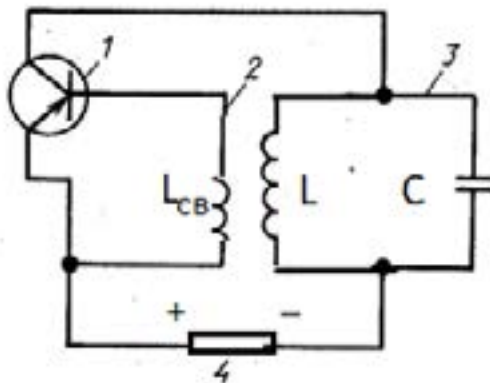


Рисунок 3 – Синхронизация подпитки колебательного контура.

В данной схеме частота колебаний энергии в LC-контуре определяется ёмкостью конденсатора и индуктивностью катушки. Катушка связи $L_{св}$ обеспечивает обратную связь между колебательным контуром и источником тока, а транзистор регулирует подачу энергии от источника в колебательный контур (КК).

При таком подходе энергия W может сохраняться в контуре до тех пор, пока осуществляется подпитка КК электрической энергией. Для этого транзистору необходимо подавать питание от источника (рисунок 4).

Физика предложенной концепции заключается в следующем. Если ток в кольце постоянный (DC), колебательный контур на него не реагирует и не возникает колебаний. Для возбуждения колебаний требуется переменный ток или импульсный сигнал (AC). При создании в кольце переменного тока (например, синусоидального или импульсного) LC-контур начинает резонировать, если его собственная частота совпадает с частотой внешних колебаний. В резонансном режиме контур способен эффективно накапливать и отдавать энергию – с него можно снимать десятки ватт и более, в зависимости от параметров КК.

Если колебательный контур параллельно подключить к микросети ветроустановок (рисунок 4), КК можно использовать для накопления энергии и её последующего съёма. Таким образом, LC-контур в этой схеме выполняет роль распределённого накопителя энергии, повышая стабильность и управляемость микросети.



Рисунок 4 – Микросеть с подключенным КК.

На рисунке 4 показана кольцевая микросеть, состоящая из нескольких ветроустановок, соединённых между собой через замкнутой шиной. Основные элементы схемы:

Ветроустановки – четыре ветрогенератора, каждый из которых преобразует кинетическую энергию ветра в электрическую. На рисунке они расположены по углам кольца.

Соединительные линии – линии, соединяющие ветроустановки с кольцевой шиной, обеспечивают передачу электроэнергии между генераторами и микросетью.

Замкнутая кольцевая шина – основной контур микросети, обеспечивающий распределённую передачу энергии и повышающую устойчивость сети за счёт резервирования путей.

Элементы управления и нагрузки (обозначены в виде переключателей и прямоугольников) – позволяют регулировать поток энергии, подключать

или отключать отдельные ветроустановки и направлять электроэнергию в накопители или потребители.

Если к этой микросети параллельно подключить автоколебательный контур (рисунок 3), подпитывающийся от кольцевой шины микросети, то на этом автоколебательном контуре (АКК) можно накапливать электрическую энергию, величина которой зависит от добротности контура [13]. На рисунке 5 показан такой динамический накопитель электрической энергии.

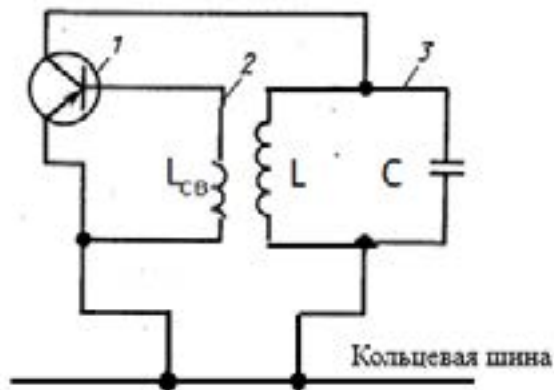


Рисунок 5 - Динамический накопитель электрической мощности.

Схема демонстрирует распределённое накопление энергии и управление её потоками, что позволяет оптимизировать работу микросети, сглаживать скачки выработки энергии и обеспечивать резервное питание при колебаниях нагрузки.

Результаты и обсуждение

Если АКК-контур будет частью схемы, которая заряжается от генератора (ветра), и в нужный момент отдаёт энергию в нагрузку, то колебательный контур вполне может накапливать электрическую энергию. Например, допустим, что АКК имеет следующие параметры:

$$C=100 \text{ мкФ}; U_{\text{max}}=200 \text{ В}$$

Энергия, запасённая за один цикл:

$$W = \frac{1}{2} C U^2 = 0.5 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot 200^2 = 2 \text{ Дж}$$

Теперь допустим, что мы снимаем эту энергию 1000 раз в секунду (1 кГц частота разряда):

$$P = W \cdot f = 2 \cdot 1000 = 2000 \text{ Вт} = 2 \text{ кВт}$$

Теперь за один час (3600 сек):

$$E = P \cdot t = 2000 \cdot 3600 = 720000 \text{ Дж} = 2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Если АКК используется в составе системы, которая заряжается до 200 В, разряжается 1000 раз в секунду и при каждом разряде отдаёт 2 Дж энергии, то мгновенная мощность будет:

$$P = E \cdot f = 2 \text{ Дж} \cdot 1000 \text{ Гц} = 2000 \text{ Вт} = 2 \text{ кВт}$$

Таким образом, система может обеспечивать около 2 кВт средней мощности и выдавать примерно 2 кВт·ч энергии за 1 час работы. Если энергия не снимается каждый цикл, а АКК подпитывает колебательный контур, то энергия циркулирует внутри контура, не исчезая (с учётом потерь). В любой момент можно организовать съём энергии – АКК в данном случае работает не как батарея, а как резонансный посредник для передачи, трансформации и кратковременного накопления энергии.

АКК действительно используется в составе преобразователей: инверторов, импульсных буферов, схем сглаживания и усиления мощности. Он позволяет периодически снимать энергию с источника (например, ветроустановки), даже если генерация нестабильна.

В реальных условиях мощность может составлять от десятков ватт до нескольких киловатт, в зависимости от частоты разрядов, напряжения, характеристик АКК и КПД схемы. За час можно получить от 100 Вт·ч до 2–3 кВт·ч, если система работает эффективно.

Расчет по ветроустановкам:

Допустим, в системе установлено 4 ветроустановки (рис. 3), и каждая генерирует:

$$E_{\text{общ}} = 4 \times 2 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Таким образом, четыре ветроустановки суммарно подают в сеть около 8 кВт·ч энергии за час.

Если КК является частью системы накопления или передачи энергии и рассчитан на работу с мощностями порядка нескольких киловатт (как мы оценивали ранее), он действительно может выполнять функции буфера: принимать энергию, временно хранить её в виде колебательного процесса и отдавать на нагрузку или в другую часть сети.

При правильной настройке (резонанс, минимальные потери, качественные компоненты) и хорошем КПД, колебательный контур способен передавать мощность, сравнимую с входной – то есть примерно до 8 кВт в режиме установившейся работы.

Однако из-за реальных ограничений:

- сопротивления проводников, катушек и переключателей;
- диэлектрических потерь в конденсаторе;
- ограничений ключевых элементов;
- нагрева и паразитных потерь,
- эффективность редко достигает 100%. Типичный рабочий КПД

таких схем составляет 70–90%.

$$P_{\text{реальная}} = 0,7-0,9 \cdot 8 \text{ кВт} = 5,5-7,2 \text{ кВт}$$

То есть примерно 5,5–7 кВт полезной мощности могут быть переданы через АКК без перегрузки и значительных потерь.

Параметр	Значение
Количество ветроустановок	4
Выработка каждой (за час)	2 кВт·ч
Общая выработка	8 кВт·ч
Реальная отдача через LC	~5.5–7 кВт·ч (с учетом КПД)

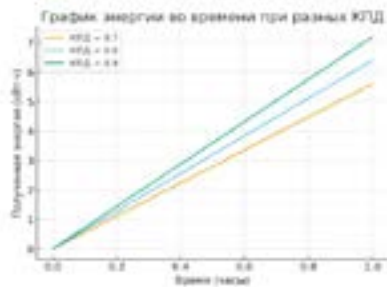
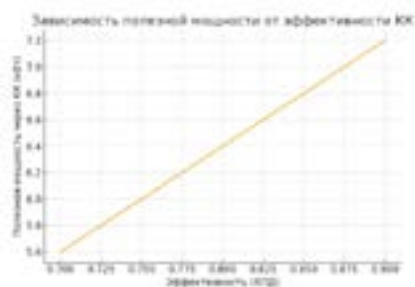


Рисунок 6 – Зависимость полезной мощности от эффективности КК (а) и график энергии во времени при разных КПД (б).

Это означает, что рост эффективности напрямую увеличивает количество энергии, которую система способна передать в нагрузку. Улучшение КПД АКК приводит к снижению внутренних потерь и более полному использованию энергии, поступающей от источника. Линейный

характер графика указывает на стабильность процесса и минимальное влияние побочных факторов. А второй график показывает, что эффективность системы напрямую влияет на суммарную собранную энергию. Разница между линиями демонстрирует потенциал увеличения производительности при оптимизации параметров КК.

Выводы

Предложенная концепция распределённого хранения электроэнергии, с использованием параллельно подключённого автоколебательного контура на замкнутую шину микросети представляет собой инновационный и перспективный подход к распределённому накоплению электрической энергии.

Автоколебательный контур, работающий в резонансном режиме, способен обеспечивать быстрый обмен энергией между узлами сети, сглаживать пиковые нагрузки, компенсировать колебания генерации от возобновляемых источников и повышать стабильность напряжения. За счёт параллельного включения таких контуров формируется распределённая структура накопления энергии, которая не требует крупных централизованных аккумуляторных станций и может быть адаптирована под любые условия микросетей.

Дальнейшие исследования и экспериментальная отработка позволяет оптимизировать параметры контуров, выбрать оптимальные частоты резонанса, снизить паразитные потери, разработать эффективные алгоритмы управления потоками мощности и обеспечить интеграцию технологии в существующую инфраструктуру.

Распределённое накопление энергии – это неизбежный тренд будущего развития энергетики. В условиях широкого внедрения возобновляемых источников, роста потребности в пиковом покрытии нагрузки, необходимости заполнения провалов генерации, участия в регулировании напряжения и частоты, а также развития микросетей, системы накопления будут играть ключевую и незаменимую роль. Использование автоколебательных контуров как высокоскоростных буферных узлов может стать одним из наиболее эффективных решений для энергетики нового поколения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Соснина, Е. Н., Шалуха, А. В., Эрдили, Н. И. Повышение эффективности использования возобновляемых источников энергии в составе виртуальной электростанции на основе мультиагентного управления

// Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 3. – С. 103–113. – <https://doi.org/10.47026/1810-1909-2022-3-103-113>. EDN: HDVPGG

2 Белоусов, А. В., Жилин, Е. В., Прасол, Д. А. Разработка имитационной модели распределительной электрической сети 10 кВ для исследования возможности применения систем накопления электроэнергии с целью повышения энергоэффективности // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – № 10. – С. 45–54. EDN: UHUTFS

3 Рубан, Н. Ю., Аскарлов, А. Б., Андреев, М. В. и др. Анализ влияния возобновляемых источников энергии с силовыми преобразователями на процессы в современных энергосистемах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Energy Systems, 2023, Vol. 3, 004 Энергетические системы, 2023, № 3, 004 39 <https://j-es.ru/> Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 36. – С. 7–30. – <https://doi.org/10.15593/2224-9397/2020.4.01>. EDN: WNUSQG

4 Доброперо, К. В. К вопросу создания гибридных систем накопления электроэнергии // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2023. – Т.66. – № 3. – С. 215–232. – <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232>. EDN: AVOTEY.

5 Eroğlu, F., Kurtoglu, M., Vural, A. M. Bidirectional DC–DC converter based multilevel battery storage systems for electric vehicle and large-scale grid applications: A critical review considering different topologies, state-of-charge balancing and future trends // IET Renewable Power Generation. – 2021. – Vol. 15. – Is. 4. – P. 915–938. – <https://doi.org/10.1049/rpg2.12042>

6 Разживин, И. А., Суворов, А. А., Андреев, М. В. и др. «Обзор математических моделей систем накопления энергии для моделирования электроэнергетических систем. Часть II» // Известия РАН. Энергетика. – № 3. – 2023.

7 Рустамов, Н. Т., Мейрбеков, А. Т., Бабахан, Ш. А. Гибридная ветро-солнечная электростанция. Патент РК на полезный модель № 7391 от 19.05.2022.

8 Рустамов, Н. Т., Мейрбеков, А. Т., Авезова, Н. Р., Мейрбекова, О. Д., Бабахан, Ш. А. Гибридная система для выработки тепловой и электрической энергии. Патент РК на полезный модель № 7970 от 24.11.2023.

9 Мейрбекова, О. Д., Рустамов, Н. Т. К вопросу создания гибридных энергетических систем // Журнал «Проблемы информатики и энергетики», Ташкент, 2022. – № 3. – с. 83–90.

10 Nassim Rustamov, Shokhrukh Babakhan, Naci Genc, Adylkhan Kibishov, Oksana Meirbekov. An Improved Hybrid Wind Power Plant for Small Power Generation // INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH N. – Vol.13. – No.2. – June, 2023. – P. 629–635.

11 Кумар А., Джеян Дж. В., Агарвал А. Электромагнитный анализ высокотемпературной сверхпроводящей магнитной катушки хранения энергии (SMES) мощностью 2,5 МДж для использования в системах бесперебойного питания // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – 21: 1755–1762.

12 Калимуллин, Л. В., Левченко, Д. К., Смирнова, Ю. Б., Тузикова, Е. С. Приоритетные направления, ключевые технологии и сценарии развития систем накопления энергии // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. – 2019. – № 1. – С. 42–54. – <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2019.1.042-054>.

13 Rustamov N., Meirbekova O., Babakhan Sh. Distributed storage of electrical energy in an oscillating circuit // *International scientific-technical conference «National Energy Independence in the Age of Renewable Energy and Digital Technologies: Innovations, Prospects and Social Impact in the Fergana Region»*. – Fergana. 2025. – P. 400–407.

REFERENCES

1 Sosnina, E.N., Shaluhov, A.V., Erdili, N.I. Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya vozobnovlyаемых istochnikov energii v sostave virtualnoj elektrostancii na osnove multiagentnogo upravleniya [Increasing the efficiency of using renewable energy sources as part of a virtual power plant based on multi-agent management] // *Vestnik Chuvashskogo universiteta*. – 2022. – № 3. – P. 103–113. – <https://doi.org/10.47026/1810-1909-2022-3-103-113>. EDN: HDVPGG

2 Belousov, A. V., Zhilin, E. V., Prasol, D. A. Razrabotka imitacionnoj modeli raspredelitelnoj elektricheskoy seti 10 kV dlya issledovaniya vozmozhnosti primeneniya sistem nakopleniya elektroenergii s celyu povysheniya energoeffektivnosti [Development of a simulation model of a 10 kV electrical distribution network to study the possibility of using energy storage systems to increase energy efficiency] // *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*. – 2022. – № 10. – P. 45–54. EDN: UHUTFS

3 Ruban, N. Yu., Askarov, A. B., Andreev, M. V. et al. Analiz vliyaniya vozobnovlyаемых istochnikov energii s silovymi preobrazovatelyami na processy v sovremennykh energosistemah [Analysis of the impact of renewable energy sources with power converters on processes in modern energy systems] // *Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Energy Systems, 2023, Vol. 3, 004 Energeticheskie sistemy, 2023, № 3, 004 39* <https://jes.ru/> *Elektrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravleniya*. – 2020. – № 36. – P. 7–30. – <https://doi.org/10.15593/2224-9397/2020.4.01>. EDN: WNUSQG

4 **Dobrego, K. B.** K voprosu sozdaniya gibridnyh sistem nakopleniya elektroenergii [On the issue of creating hybrid energy storage systems] // Energetika. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh obedinenij SNG. – 2023. – Vol.66, № 3. – P. 215–232. – <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232>. EDN: AVOTEY.

5 **Eroğlu, F., Kurtoğlu, M., Vural, A. M.** Bidirectional DC–DC converter based multilevel battery storage systems for electric vehicle and large-scale grid applications: A critical review considering different topologies, state-of-charge balancing and future trends // IET Renewable Power Generation. – 2021. – Vol. 15, Is. 4. – P. 915–938. – <https://doi.org/10.1049/rpg2.12042>

6 **Razzhivin, I. A., Suvorov, A. A., Andreev, M. V. et al.** «Obzor matematicheskikh modelej sistem nakopleniya energii dlya modelirovaniya elektroenergeticheskikh sistem. Chast II» [An overview of mathematical models of energy storage systems for modeling electric power systems. Part II] (Izvestiya RAN. Energetika, № 3, 2023)

7 **Rustamov N. T., Meirbekov A. T., Babahan Sh. A.** Gibridnaya vetro-solnechnaya elektrstanciya [Hybrid wind-solar power plant]. Patent RK na poleznyj model № 7391 ot 19.05.2022.

8 **Rustamov N. T., Meirbekov A. T., Avezova N. R., Meirbekova O. D., Babahan Sh. A.** Gibridnaya sistema dlya vyrabotki teplovoj i elektricheskoy energii [Hybrid system for generating heat and electricity]. Patent RK na poleznyj model № 7970 ot 24.11.2023.

9 **Meirbekova O. D., Rustamov N. T.** K voprosu sozdaniya gibridnyh energeticheskikh sistem [On the issue of creating hybrid energy systems.] // Zhurnal «Problemy informatiki i energetiki», Tashkent, 2022, №3, p.83–90.

10 **Rustamov, N., Babakhan, Sh., Genc, N., Kibishov, A., Meirbekov, O.** An Improved Hybrid Wind Power Plant for Small Power Generation. INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH N. – Vol.13. – No.2. – June, 2023. – P. 629–635.

11 **Kumar, A., Dzheyhan, Dzh. V., Agarval, A.** Elektromagnitnyj analiz vysokotemperaturnoj sverhprovodyashej magnitnoj katushki hraneniya energii (SMES) moshnostyu 2,5 MDzh dlya ispolzovaniya v sistemah besperebojnogo pitaniya [Electromagnetic analysis of a 2.5 MJ High-temperature Superconducting Magnetic Energy Storage Coil (SMES) for use in uninterruptible power supply systems]. Materials Today: Proceedings, 2020, 21: 1755–1762.

12 **Kalimullin, L. V., Levchenko, D. K., Smirnova, Yu. B., Tuzikova, E. S.** Prioritetnye napravleniya, klyuchevye tehnologii i scenari razvitiya sistem nakopleniya energii [Priority areas, key technologies and scenarios for the development of energy storage systems] // Vestnik Ivanovskogo

gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. – 2019. – № 1. – P. 42–54.
– <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2019.1.042-054>.

13 **Rustamov, N., Meirbekova, O., Babakhan, Sh.** Distributed storage of electrical energy in an oscillating circuit. // International scientific-technical conference «National Energy Independence in the Age of Renewable Energy and Digital Technologies: Innovations, Prospects and Social Impact in the Fergana Region», Fergana. – 2025. – P. 400–407.

Поступило в редакцию 16.02.26.

Поступило с исправлениями 25.02.26.

Принято в печать 22.05.26.

*Н. Т. Рустамов¹, *О. Д. Меирбекова², А. Н. Бергузинов³,
Б. С. Мухаммадиев⁴, А. Г. Калтаев⁵*

^{1,2}Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,,
Қазақстан Республикасы Түркістан қ.;

^{3,5}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;

⁴Жизак политехника институты, Өзбекстан Республикасы, Жизак қ.

16.02.26 ж. баспаға түсті.

25.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

22.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АВТОТЕРБЕЛМЕЛІ ТІЗБЕКТЕ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫНЫҢ ЖИНАҚТАЛУЫ

Бүгінде құрылымында жаңартылатын энергия көздері басым болатын энергетикалық жүйелердің дамуымен энергияны сақтаудың тиімді жүйелерін қолдану ерекше өзекті болып отырғаны жасырын емес. Бұл жұмыста сақиналы микрожәліге біріктірілген жел қондырғылары мен күн панельдері өндіретін электр энергиясын жинақтау мәселелері қарастырылады. Электр энергиясын сақтаудың балама динамикалық әдісі ретінде автотербелмелі LC-контурын пайдалану ұсынылады. Бұл жағдайда автотербелмелі контур микрожәлінің инасына параллель қосылып, қуаттың ауытқуын өтеуге ғана емес, қысқа мерзімді энергия жинақтауға да мүмкіндік береді. Мұндай тәсіл микрожәлінің тұрақтылығын арттыруға және айнымалы генерация жағдайында электр энергиясының сапасын жақсартуға ықпал етеді.

Автотербелмелі контур арқылы электр энергиясын динамикалық түрде жинақтаудың мүмкіндігін растайтын есептеулер келтіріледі, сондай-ақ автотербелістердің тұрақтылық шарттары, LC-тізбектің доброттілігі және паразиттік параметрлердің сақтау тиімділігіне әсері талданады. Сонымен қатар, бөлінген энергия жүйелеріне автотербелмелі контурларды интеграциялау ерекшеліктері және олардың ЖЭК үлесі жоғары автономды және гибриді энергия кешендеріндегі әлеуетті қолданылуы қарастырылады. Ұсынылған әдіс дәстүрлі электрохимиялық энергия жинақтағыштарын қолданбай-ақ микрожелілердің сенімділігі мен тұрақтылығын арттырудың қосымша құралы ретінде қарастырылуы мүмкін екені көрсетілді. Алынған нәтижелер айнымалы жүктеме мен генерация жағдайында таралған энергия өндіру жүйелерінде автотербелмелі LC-контурларды қолданудың болашағы зор екенін дәлелдейді.

Кілтті сөздер: микрожелі, сақиналы шина, динамикалық жинау, тербелмелі контур, параллель қосу.

N. T. Rustamov¹, *O. D. Meirbekova² A. N. Berguzinov³,

B. S. Mukhamadiyev⁴, A. G. Kaltayev⁵

^{1,2}Akhmet Yassawi International Kazakh–Turkish University,
Republic of Kazakhstan, Turkistan;

^{3,5}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

⁴Zhizak Polytechnic Institute, Republic of Uzbekistan, Zhizak.

Received 16.02.26.

Received in revised form 25.02.26.

Accepted for publication 22.05.26.

HYBRID DISTRIBUTED GENERATION POWERED BY BIOFUELS

Today, with the development of energy systems dominated by renewable energy sources, the use of efficient energy storage systems has become increasingly relevant. This paper examines issues related to the storage of electrical energy generated by wind turbines and solar panels integrated into a ring microgrid. An auto-oscillating LC circuit is proposed as an alternative dynamic method for electrical energy storage. In this configuration, the auto-oscillating circuit is connected in parallel to the microgrid bus, which allows not only to compensate for power fluctuations

but also to provide short-term energy storage. This approach helps enhance the stability of the microgrid and improve power quality under variable generation conditions.

The paper presents calculations confirming the possibility of dynamic energy storage using the auto-oscillating circuit, as well as an analysis of the conditions for sustaining auto-oscillations, the quality factor of the LC circuit, and the influence of parasitic parameters on storage efficiency. In addition, the integration features of auto-oscillating circuits into distributed energy systems and their potential application in autonomous and hybrid energy complexes with a high share of renewable energy sources are considered. It is shown that the proposed method can be considered as an auxiliary means of improving the reliability and stability of microgrids without the use of conventional electrochemical energy storage systems. The obtained results confirm the нецелесообразность of applying self-oscillating LC circuits in distributed generation systems under conditions of variable load and generation.

Keywords: microgrid, ring bus, dynamic storage, oscillatory circuit, parallel connection.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz