

**СЕКЦИЯ 5**  
**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ**  
**СТРОИТЕЛЬСТВА И ПОДГОТОВКА ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ**

УДК

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕРТОРОВ,**  
**ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ**

*Абдыкадырова О. Н., старший преподаватель,  
заведующий кафедрой электромеханики, государственный энергетический  
институт Туркменистана, Мары Туркменистан*

*Гурбанмырадов Ю. А., преподаватель кафедры высшей математики,  
государственный энергетический институт Туркменистана,*

*Келова Ш. Н., лаборант кафедры электромеханики, государственный  
энергетический институт Туркменистана, Мары Туркменистан*

**Реферат**

В данной статье анализируются технологии повышения эффективности инверторов, используемых в альтернативных источниках энергии. Подробно описаны эффекты использования параллельных инверторов для улучшения качества электроэнергии и обеспечения стабильности напряжения. Обсуждаются связанные вопросы, со снижением гармонических искажений, фазовая синхронизация и надежность инверторов.

**Ключевые слова:** Альтернативная энергетика, инверторы, параллельное соединение, стабильность напряжения, гармонические искажения, фазовая синхронизация, качество электроэнергии, КПД.

**INVERTER EFFICIENCY IMPROVEMENT**  
**TECHNOLOGY USED IN ALTERNATIVE ENERGY SOURCES**

**Abstract**

This paper analyzes technologies for improving the efficiency of inverters used in alternative energy sources. The effects of using parallel inverters to improve power quality and voltage stability are detailed. Issues such as harmonic distortion reduction, phase synchronization and inverter reliability are discussed.

**Keywords:** Alternative energy, inverters, parallel connection, voltage stability, harmonic distortion, phase synchronization, power quality, efficiency.

**Введение**

Альтернативные источники энергии играют важную роль в удовлетворении энергетических потребностей постоянно растущего мира. Возобновляемые источники энергии, такие как солнечная, ветровая, биомасса и геотермальная энергии, являются экологически чистыми источниками энергии. В использующих возобновляемые источники энергии энергосистемах инверторы являются одной из ключевых технологий управления питанием.

Инверторы служат для преобразования генерируемого постоянного тока в переменный ток, используемый в обычных энергосистемах. В данной статье представлен подробный анализ современных технологий, используемых для повышения эффективности инверторов, используемых в системах альтернативной энергетики. Повышение эффективности инверторов напрямую связано с сокращением потерь энергии, снижением затрат на электроэнергию и улучшением общего преобразования энергии.

1. Инверторы и их роль в альтернативной энергетике. Постоянный ток, генерируемый из альтернативных источников энергии, не может напрямую использоваться энергосистемами. Это связано с тем, что общая энергосистема работает на переменном токе. Таким образом, инверторы являются важными устройствами для преобразования постоянного тока в переменный. Инверторы являются особо важными компонентами в использовании возобновляемых источников энергии, таких как солнечные панели и ветряные турбины. Они гарантируют полную совместимость вырабатываемой энергии с системой переменного тока.

Инверторы, в первую очередь, предназначены для достижения высокой эффективности преобразования. Количество потерь, возникающих при преобразовании энергии, и правильное распределение мощности определяют качество и эффективность инвертора. В процессе преобразования энергии инверторы вызывают потери энергии в виде тепла, что приводит к снижению эффективности. Поэтому основная цель в современных инверторных технологиях – осуществить преобразование энергии с минимальными потерями.

2. Основное направление повышения эффективности инверторов – технологическая инновация и модернизация инверторных конструкций, которая играет важную роль в повышении эффективности инверторов. В этой области используется несколько основных подходов, влияющих на эксплуатационные характеристики инверторов.

а) многофазные инверторы – они достигают более высокой эффективности за счет подключения нескольких преобразователей постоянного и переменного тока в единую систему. Это решение предотвращает попадание общей нагрузки на один инвертор, обеспечивая широкое использование инвертора. В результате каждый инвертор работает в оптимальных условиях эксплуатации, а процесс преобразования энергии направляется в соответствии с требуемой нагрузкой;

б) параллельное подключение инверторов – параллельное соединение инверторов обеспечивает стабильность системы преобразования энергии. Параллельные инверторы обеспечивают более стабильную работу каждого инвертора при равномерном распределении общей мощности. Этот метод не только снижает потери энергии, но и повышает производительность системы;

в) новые высокоэффективные модули, – развитием инверторной технологии стали широко использоваться более эффективные модули, а именно транзисторы и элементы IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором). Технология IGBT помогает снизить потери мощности и улучшить управление при высокочастотном преобразовании.

г) микроинверторные системы – микроинверторы могут быть подключены к каждой солнечной панели отдельно и преобразовывать энергию, получаемую

каждой панелью отдельно. Эта технология позволяет отдельным панелям работать с максимальной эффективностью, не влияя на производительность других панелей даже в случае затенения или другого воздействия. Микроинверторы широко используются, особенно в небольших системах и гибридных энергосистемах.

д) алгоритмы интеллектуального управления – для инверторов используются алгоритмы интеллектуального управления нового поколения, эти алгоритмы позволяют достичь максимальной эффективности за счет регулировки потока энергии в соответствии с требованиями системы. В то время как традиционные инверторы выполняют только преобразование энергии, современные интеллектуальные инверторы обеспечивают распределение нагрузки, снижение потерь и оптимизацию производства в зависимости от состояния системы.

### 3. Технологическое направление развития инверторов.

С развитием технологий в общей конструкции инверторов также появились некоторые серьезные изменения. Эти изменения улучшили производительность и эффективность инверторов. Сегодня производители инверторов разрабатывают несколько новых решений.

а) инверторы для возобновляемых источников энергии – инверторы разрабатываются для частных гибридных энергетических систем. Эти инверторы эффективно управляют энергией из таких источников как солнечная энергия, энергия ветра и батареи. Такие инверторы предназначены для управления потоком энергии между всеми источниками и предотвращения потерь;

б) интеграция с системами управления – интеграция инверторов в системы управления и системы SCADA (диспетчерского управления и сбора данных) позволяет более эффективно управлять энергосистемой. Такая интеграция повышает общую эффективность системы за счет более точного контроля и управления потоками энергии;

в) Годовые системы управления – тепло, выделяемое при работе инверторов, снижает эффективность преобразования. В новых тенденциях техники разрабатываются конструкции инверторов с пониженным тепловыделением. Потери тепла можно минимизировать за счет использования более совершенных систем охлаждения.

### 4. Преимущества оптимизации эффективности инвертора.

Повышение эффективности инверторов дает несколько важных преимуществ.

- Улучшенное преобразование энергии – потери энергии при преобразовании энергии уменьшаются, что повышает общую эффективность инвертора.

- Сокращение затрат – в долгосрочной перспективе затраты на электроэнергию снижаются по мере уменьшения потерь энергии.

- Экологичное производство – более эффективные инверторы помогают более эффективно использовать энергетические ресурсы и увеличить использование экологически чистой энергии.

- Продленный срок службы приборов – высокоэффективные инверторы не только повышают энергоэффективность, но и обеспечивают длительную работу приборов.

## 5. Параллельное подключение инверторов.

Параллельное соединение инверторов может повысить надежность системы за счет увеличения общей мощности и предполагает подключение нескольких инверторов к одной системе. Основные положительные моменты.

- Включение питания – позволяет отключать питание нескольких инверторов, что особенно важно для крупных солнечных устройств.
- Распределение нагрузки – снижает нагрузку на каждый инвертор, что может продлить срок службы оборудования.
- Допуск нестабильности – если один инвертор работает нестабильно, остальные продолжают работу, повышая надежность всей системы.

## 6. Влияние на качество электроэнергии.

Качество электроэнергии определяется такими параметрами, как напряжение, частота и гармоники. Параллельное подключение инверторов может положительно повлиять на следующие показатели:

- стабильность напряжения – параллельно подключенные инверторы могут обеспечить более стабильное выходное напряжение при распределенной нагрузке;
- снижение гармоник – современные инверторы оснащены фильтрами, снижающими уровень гармонических искажений. При параллельном соединении их эффект может быть увеличен;
- синхронизация – современные инверторы могут синхронизировать работу, что помогает избежать проблем, связанных с колебаниями частоты и напряжения.

## 7. Преимущества и недостатки.

Преимущества:

- повышение надежности и стабильности системы;
- улучшение качества электроэнергии;
- возможность масштабирования системы.

Недостатки:

- сложность конструкции и монтажа;
- необходимость управления более сложной системой;
- проблемы с согласованием выходных характеристик инверторов.

Роль параллельных инверторов в повышении эффективности важна и широко используется в энергосистемах, особенно в альтернативных источниках энергии, таких как солнечная и ветровая энергия. Этот подход имеет несколько ключевых преимуществ, которые могут оказать существенное влияние на общую эффективность системы.

*Влияние параллельного подключения инверторов на эффективность.*

Надежность и стабильность в условиях неисправности. Параллельное подключение инверторов значительно повышает надежность системы. Если один инвертор выйдет из строя, другие инверторы смогут поддерживать работу системы. Это особенно важно в крупных и нестабильных энергосистемах, поскольку позволяет продолжать производство энергии без сбоев системы.

*Равное распределение нагрузки между инверторами.*

При параллельном подключении общая нагрузка распределяется поровну между инверторами. Это позволяет каждому инвертору работать более эффективно и стабильно. В этом случае каждый инвертор находится в наилучших рабочих условиях, что позволяет снизить потери энергии и повысить общую эффективность. Работа инверторов с равномерно распределенной нагрузкой снижает их нагрев, что снижает потери энергии.

### *Продление срока службы устройства.*

За счет параллельного подключения нагрузка инверторов распределяется равномерно, что увеличивает их способность работать в течение более длительного периода времени.

### *Масштабируемость системы.*

Параллельные инверторные системы более удобны для увеличения мощности за счет добавления новых инверторов в систему в любое время по мере необходимости. Такой подход повышает модульность системы и делает ее гибкой по требованию.

### *Снижает потери энергии при работе с низкими нагрузками.*

Работа инвертора на низкой мощности снижает эффективность. В параллельной инверторной системе можно включать некоторые инверторы и временно отключать другие, когда используемая мощность низкая. Это гарантирует, что каждый инвертор работает с максимальной эффективностью.

### *Оптимизация управления питанием.*

Параллельные инверторные системы работают в зависимости от частоты или потребности в энергии, что позволяет каждой из них работать в оптимальных условиях. Благодаря таким алгоритмам управления каждый инвертор оптимально преобразует энергию, что повышает эффективность.

### *Сокращение потерь мощности системы на больших расстояниях.*

Параллельное соединение инверторов снижает потери в кабеле и повышает общую эффективность передачи энергии. Это может быть особенно полезно при передаче энергии на большие расстояния в больших системах.

Несмотря на множество преимуществ параллельного подключения инверторов, есть и некоторые недостатки.

- **Задача синхронизации** – если инверторы работают параллельно, необходимо обеспечить синхронизацию и выравнивание фаз между ними. Неправильная синхронизация может привести к нестабильности системы и искажениям формы сигналов.

- **Аппаратное обеспечение и мощность.** Параллельные инверторные системы требуют большего количества аппаратного обеспечения, что может увеличить первоначальные финансовые затраты. Однако в долгосрочной перспективе повышение эффективности и надежности может компенсировать эти затраты.

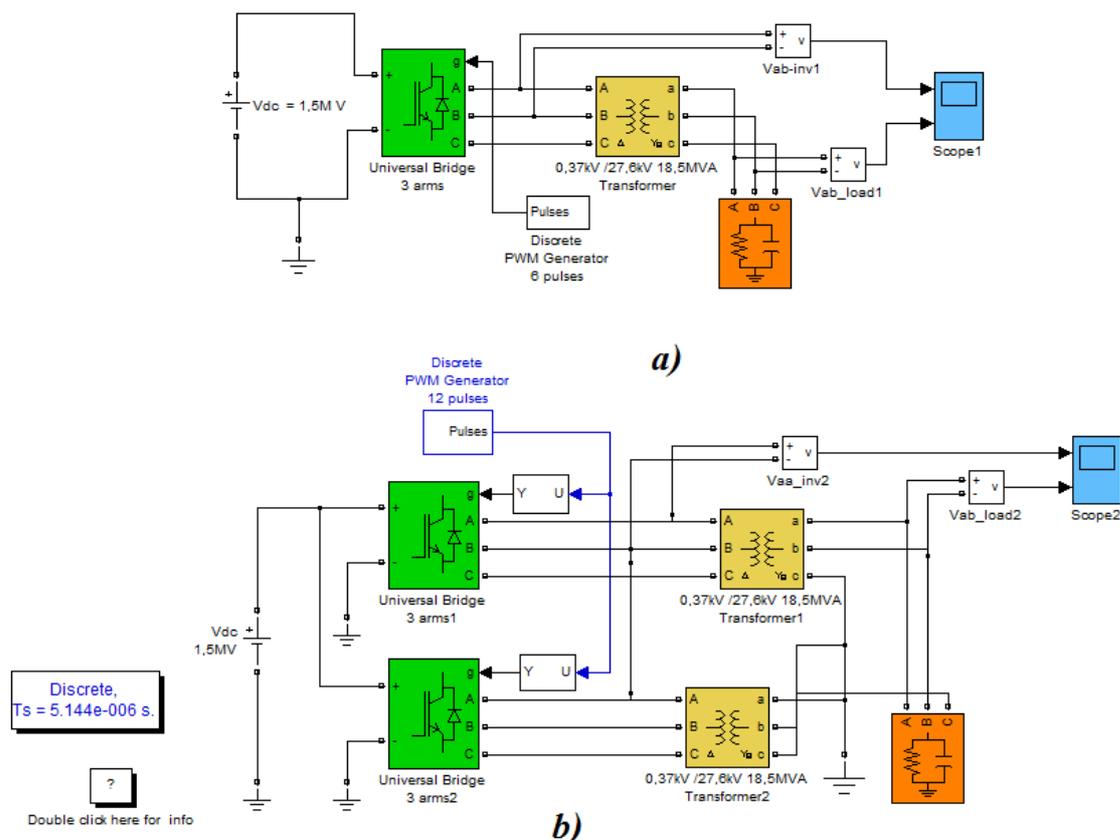
- **Сложность управления.** Управление параллельными системами может быть более сложным, поскольку требуется синхронная работа разных инверторов и правильное распределение нагрузки. Система также требует отдельного мониторинга для каждого инвертора.

- **Электромагнитные помехи (EMI).** Параллельно работающие инверторы могут вызывать электромагнитные помехи. Решения этой проблемы необходимо учитывать во время планирования системы и работы над проектом.

В этой статье для интеграции солнечной энергии в высоковольтную систему использовались модели с одним инверторным трансформатором и с двумя параллельно соединенными инверторными трансформаторами, а также исследовались их эффективность, надежность и влияние на качество электроэнергии.

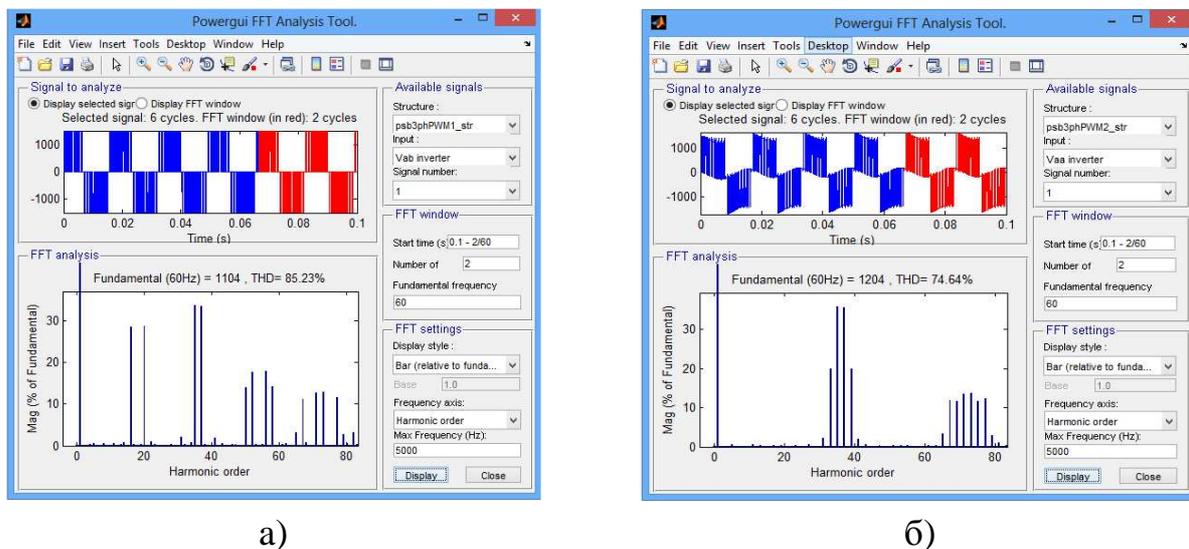
Для этого были использованы полная мощность и напряжение из паспортных данных трансформатора. С использованием этих параметров в программе Matlab персонального компьютера была построена электрическая модель

экспериментальной установки, электрическая схема которой представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Принципиальная схема электрической модели эксперимента по солнечной энергетике с использованием одного (а) и двух (б) параллельно соединенных инверторов и трансформаторов**

Результаты, полученные при запуске системы с одним инвертором (а) и системы с двумя параллельно подключенными инверторами (б), показаны на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Окно анализа, показывающее влияние одного (а) и двух параллельно подключенных инверторов (б) на гармонический ток**

Как видно из рисунка, коэффициент гармоник напряжения в солнечной системе с одним инвертором (а) составляет  $\text{THD} = 85,23 \%$ , а в солнечной системе с двумя параллельно включенными инверторами (б)  $\text{THD} = 74,64 \%$ . В результате повышается стабильность напряжения и повышается качество электроэнергии в параллельно подключенной инверторной системе.

Кроме того, в модели, представленной на рисунке 1, были измерены величины выходных напряжений в обеих системах при разных значениях постоянного напряжения. Полученные значения показаны в таблице 1 (постоянное напряжение: 1,3 МВт; 1,4 МВт; 1,5 МВт), а график соответствующих выходных напряжений инвертора и трансформатора показан на рисунке 2.

Таблица 1 – Значения выходного напряжения инвертора и трансформатора

Определение	Постоянного напряжения (МВт)	Инвертора Выходное напряжение (МВт)	Трансформатор Выходное напряжение (МВт)	Параллельных трансформаторов выходное напряжение (МВт)
$U$	1,3	1,3	63	69
$U$	1,4	1,4	68	75
$U$	1,5	1,5	73	80

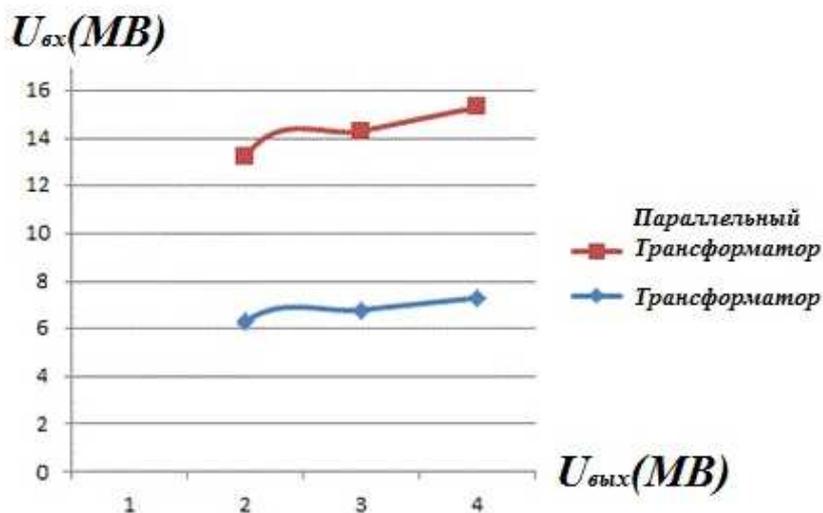


Рисунок 3 – График выходных напряжений одного и двух параллельно включенных трансформаторов

Как видно из полученных графиков, выходная мощность увеличивается в системе с двумя инверторами и трансформаторами, включенными параллельно.

Результаты этих исследований показывают, что добавление солнечной энергии в высоковольтную систему через параллельно подключенные устройства может улучшить стабильность системы, качество электроэнергии, надежность и эффективность.

### Заключение

Повышение эффективности инверторов, используемых в альтернативных источниках энергии, является важным шагом в оптимизации процесса преобразования энергии. Параллельно подключенные инверторы обеспечивают стабильность системы, качество напряжения и снижение гармонических искажений. Эта технология повышает надежность энергоснабжения и балансирует распределение электроэнергии, тем самым повышая эффективность производства

энергии. Кроме того, предотвращение перегрева и перегрузок способствует длительной и стабильной работе системы.

Параллельное подключение инверторов – один из важных шагов для более эффективного и надежного использования солнечной энергии. Этот метод не только обеспечивает стабильность напряжения и мощности, но и повышает качество процесса преобразования энергии, фазы синхронизируются и электрическая система работает более надежно.

#### **Список цитированных источников**

1. Абдыкадырова, О. Гармонические искажения напряжения в солнечной энергетике / О. Абдыкадырова, П. Оразмаммедов // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 27–28 апр. 2023 г.: в 2 ч. / М-во образ. Респ. Бел., Гомельский гос. техн. ун-тет им. П. О. Сухого ; пол. общей ред. А. А. Бойко. – Гомель :ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – Ч. 1. – 305 с.

2. Samarasekera, K. Fault Ride-Through Capability of Grid Integrated Solar Power Plants. June 1st, 2015.

3. Треш, А. М. Моделирование солнечных батарей в среде Matlab/Simulink / А. М. Треш. – Минск, 2013.

УДК 624.04(75.8)

## **О РАСЧЕТАХ ДВУХШАРНИРНЫХ КРУГОВЫХ АРОК**

***Н. В. Бочарова**, магистр технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической и прикладной механики, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: nati444bonta@gmail.com*

***В. И. Игнатюк**, канд. техн. наук, доцент, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: Viignatiuk@mail.ru*

***А. А. Никитина**, студент 3-го курса, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: saschka5002@gmail.com*

### **Реферат**

В статье рассмотрена задача расчета и исследования двухшарнирных круговых арок постоянного сечения, нагруженных снеговыми нагрузками, распределенными по параболической зависимости. Получены выражения внутренних сил в произвольном сечении системы (изгибающих моментов, поперечных и продольных сил) и выражения для определения вертикальных, горизонтальных и полных перемещений сечений.

Вывод зависимостей для усилий выполнен с использованием метода расчета статически неопределимых систем – метода сил, а для определения перемещений используется формула Мора, в которой учитываются все силовые факторы, возникающие в системе.

Разработана методика и алгоритм расчета в среде MathCad. Выполнена численная реализация расчета двухшарнирной арки в программных комплексах Lira, Scad, SolidWorks.