

**УДК 621.315.1**

**Карпиченко Максим Евгеньевич**, магистрант, 2 курса, кафедры строительства энергетики и транспорта Мурманского арктического университета, г. Мурманск

## **СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

### **Аннотация**

В статье рассматриваются современные и перспективные технологии транспортировки электроэнергии, применяемые в магистральных и распределительных сетях. Цель работы состоит в сравнительном анализе воздушных и кабельных линий электропередачи, систем постоянного тока высокого напряжения, сверхпроводящих, беспроводных и газоизолированных решений. Показано, что выбор технологии зависит от дальности передачи, требуемой мощности, условий прокладки, стоимости строительства, надежности и экологических ограничений. Сделан вывод о необходимости комплексного сочетания традиционных и инновационных решений при развитии энергетической инфраструктуры.

### **Annotation**

The article considers modern and promising technologies for electricity transportation used in transmission and distribution networks. The purpose of the study is to compare overhead and cable power lines, high-voltage direct current systems, superconducting, wireless and gas-insulated solutions. It is shown that the choice of technology depends on transmission distance, required power, installation conditions, construction cost, reliability and environmental restrictions. The conclusion is made that the development of energy infrastructure requires an integrated combination of traditional and innovative solutions.

**Ключевые слова:** электроэнергия, линии электропередачи, кабельные линии, постоянный ток высокого напряжения, сверхпроводящие линии, беспроводная передача энергии, газоизолированные линии.

**Keywords:** electricity, power transmission lines, cable lines, high-voltage direct current, superconducting lines, wireless power transmission, gas-insulated lines.

## **Введение**

Электроэнергия является одной из базовых составляющих современной цивилизации. Ее устойчивая и эффективная транспортировка от мест генерации к центрам потребления относится к числу важнейших задач мировой энергетики. Рост населения, урбанизация, цифровизация экономики, развитие электротранспорта и увеличение доли энергоемких производств предъявляют все более высокие требования к пропускной способности, надежности и экономичности систем передачи электроэнергии [1].

Передача электроэнергии связана не только с техническими, но и с экономическими, экологическими и градостроительными ограничениями. Для магистральных сетей приоритетными становятся снижение потерь и повышение управляемости потоков мощности, а для городских территорий — компактность, безопасность и минимальное воздействие на окружающую среду. В связи с этим актуальным является анализ как традиционных, так и перспективных технологий транспортировки электроэнергии [3].

Целью статьи является рассмотрение основных способов передачи электроэнергии и оценка их преимуществ, недостатков и перспектив применения. Для достижения цели проанализированы воздушные и кабельные линии, системы постоянного тока высокого напряжения, сверхпроводящие линии, беспроводная передача энергии и газоизолированные линии. Такой подход позволяет сопоставить технологии не изолированно, а с учетом условий их практического использования.

## **1. Современные технологии транспортировки электроэнергии**

### **1.1. Воздушные линии электропередачи**

Воздушные линии электропередачи являются наиболее распространенным и экономичным способом передачи больших объемов

электроэнергии на значительные расстояния. Конструктивно они представляют собой систему проводов, подвешенных на опорах с помощью изоляторов. Данная технология получила широкое распространение благодаря сравнительно низкой стоимости строительства, возможности оперативного ремонта и высокой пропускной способности при использовании сверхвысоких классов напряжения [1].

Передача энергии по воздушным линиям обычно осуществляется трехфазным переменным током. Классификация линий ведется по номинальному напряжению: линии низкого напряжения применяются в распределительных сетях, линии среднего напряжения обслуживают районные и промышленные объекты, а линии высокого, сверхвысокого и ультравысокого напряжения используются для магистральной передачи электроэнергии. Чем выше напряжение, тем меньший ток требуется для передачи той же мощности, что позволяет снизить потери на нагрев проводов.

К основным преимуществам воздушных линий относятся относительно низкая стоимость строительства и эксплуатации, простота диагностики повреждений, доступность оборудования и возможность передачи значительных мощностей. Благодаря этим свойствам воздушные линии остаются основой магистральных электрических сетей и широко применяются при соединении крупных электростанций с промышленными и городскими центрами потребления.

Вместе с тем воздушные линии имеют ряд существенных недостатков. На дальних расстояниях возникают потери электроэнергии, связанные с активным сопротивлением проводов и коронными разрядами. Кроме того, такие линии требуют отчуждения земель, создают визуальное воздействие на ландшафт и электромагнитное поле. Надежность воздушных линий зависит от погодных условий: гроз, гололеда, сильного ветра и других атмосферных факторов. В густонаселенных районах строительство воздушных линий часто ограничено градостроительными и экологическими требованиями.

## 1.2. Кабельные линии электропередачи

Кабельные линии используются прежде всего в городах, на территориях промышленных предприятий, на подводных переходах и в местах, где строительство воздушных линий невозможно или нецелесообразно. Кабель представляет собой один или несколько изолированных проводников, заключенных в защитную оболочку. В качестве изоляции применяются пропитанная бумага, сшитый полиэтилен, этилен-пропиленовая резина и другие материалы [3].

Главное преимущество кабельных линий состоит в защищенности проводников от внешних воздействий. Такая конструкция повышает безопасность эксплуатации, уменьшает вероятность механических повреждений и позволяет прокладывать линии под землей, под водой, в тоннелях и внутри зданий. Кабельные линии практически не создают визуального загрязнения и оказывают меньшее электромагнитное воздействие на окружающую среду, что особенно важно для мегаполисов.

Недостатком кабельных линий является более высокая стоимость по сравнению с воздушными линиями аналогичного класса напряжения. Кроме того, для кабелей переменного тока характерна большая емкостная проводимость, из-за которой увеличиваются зарядные токи и возникает необходимость применения устройств компенсации реактивной мощности. При повреждении кабельной линии сложнее определить место дефекта и выполнить ремонт, особенно если линия проложена под землей или под водой.

Несмотря на перечисленные ограничения, кабельные линии являются незаменимым решением для распределения энергии в мегаполисах. Они позволяют обеспечить надежное энергоснабжение при ограниченном пространстве, повысить безопасность городской среды и сохранить архитектурный облик территорий. Поэтому в городских сетях доля кабельных линий постепенно возрастает, особенно при реконструкции старых районов и строительстве новых жилых комплексов.

### **1.3. Электрические сети постоянного тока высокого напряжения**

Технология постоянного тока высокого напряжения применяется для передачи больших мощностей на очень большие расстояния, а также для связи энергосистем, работающих на разных частотах или не имеющих синхронного режима. Система обычно состоит из преобразовательной станции на передающем конце, линии электропередачи и преобразовательной станции на приемном конце [4].

На передающей станции переменный ток преобразуется в постоянный, после чего энергия передается по воздушной или кабельной линии. На приемной стороне постоянный ток снова преобразуется в переменный и поступает в энергосистему. Современные решения используют преобразователи с источником напряжения, которые обеспечивают более гибкое управление режимами работы сети и позволяют подключать удаленные источники генерации, включая ветровые и солнечные электростанции [6].

Главным преимуществом постоянного тока высокого напряжения являются меньшие потери при передаче на большие расстояния. В таких линиях отсутствуют потери, связанные с реактивной мощностью и зарядными токами, что особенно важно для протяженных подводных кабелей. Кроме того, поток мощности можно точно регулировать, что повышает устойчивость энергосистемы и позволяет управлять обменом энергии между регионами.

К недостаткам технологии относятся высокая стоимость преобразовательных станций, необходимость установки фильтров для подавления гармоник и сложность создания разветвленных сетей постоянного тока. Экономическая эффективность таких проектов проявляется преимущественно при большой передаваемой мощности и значительной дальности линии. Поэтому постоянный ток высокого напряжения наиболее оправдан для межрегиональных, межгосударственных и подводных энергетических связей.

Практическое значение данной технологии возрастает в условиях интеграции возобновляемых источников энергии. Крупные ветровые станции

нередко расположены далеко от центров потребления, а солнечная генерация может быть сосредоточена в удаленных регионах. В этих условиях линии постоянного тока позволяют передавать энергию с меньшими потерями и обеспечивать гибкое управление потоками мощности.

## **2. Перспективные и инновационные технологии передачи электроэнергии**

### **2.1. Сверхпроводящие линии электропередачи**

Сверхпроводящие линии электропередачи основаны на явлении сверхпроводимости, при котором электрическое сопротивление материала падает практически до нуля при охлаждении ниже критической температуры. Для создания таких линий применяются высокотемпературные сверхпроводящие материалы, которые охлаждаются жидким азотом или другими криогенными средами [2].

Преимуществом сверхпроводящих линий является возможность передачи очень большой мощности при минимальных потерях и высокой плотности тока. Один сверхпроводящий кабель способен заменить несколько традиционных медных или алюминиевых кабелей аналогичного диаметра. Это особенно важно для крупных городов, где прокладка новых линий затруднена из-за дефицита пространства и высокой плотности застройки.

Кроме снижения потерь, сверхпроводящие линии имеют экологические преимущества. Компактность кабеля уменьшает объем земляных работ и площадь отчуждения, а снижение потерь приводит к уменьшению потребности в дополнительной генерации. Кроме того, некоторые сверхпроводящие материалы обладают способностью ограничивать токи короткого замыкания, что может повысить надежность сетей [8].

Основными проблемами остаются высокая стоимость сверхпроводящих материалов, необходимость криогенного охлаждения и сложность обслуживания соответствующей инфраструктуры. Для практического внедрения требуется обеспечить надежность холодильных систем, снизить стоимость материалов и разработать стандартизированные решения для

эксплуатации. В настоящее время реализованы демонстрационные проекты, подтверждающие техническую осуществимость данной технологии, однако ее массовое применение зависит от дальнейшего развития материаловедения и криогенной техники.

## **2.2. Беспроводная передача электроэнергии**

Беспроводная передача электроэнергии известна со времен экспериментов Николы Теслы, однако в современной энергетике она рассматривается преимущественно для специализированных применений. Сущность таких технологий заключается в передаче энергии без проводников — посредством электромагнитного поля, лазерного излучения или микроволнового диапазона. Потенциал беспроводных систем связан с питанием мобильных устройств, электромобилей, беспилотных аппаратов и космических объектов [5].

Магнитно-резонансная связь основана на резонансном индуктивном взаимодействии двух катушек. Если передающая и приемная катушки настроены на одну частоту, энергия может передаваться на расстояние, превышающее размеры самих катушек. Такая технология уже применяется при зарядке бытовой электроники, электромобилей и медицинских имплантатов. Ее ограничением является резкое снижение эффективности при увеличении расстояния между передатчиком и приемником.

Лазерная передача энергии предполагает преобразование электрической энергии в направленное лазерное излучение, которое затем принимается фотоэлектрическим преобразователем и вновь превращается в электричество. Преимуществом является возможность передачи энергии на значительные расстояния при высокой плотности луча. Недостатками являются низкий общий коэффициент полезного действия, необходимость прямой видимости, влияние атмосферных условий и опасность излучения для живых организмов.

Передача энергии с помощью микроволнового излучения по принципу близка к лазерной технологии, но использует другой диапазон электромагнитных волн. Микроволновые системы менее чувствительны к

некоторым атмосферным воздействиям, однако требуют больших размеров антенн и строгого контроля безопасности. Наиболее перспективной областью их применения считается космическая энергетика, включая передачу энергии от орбитальных солнечных электростанций на Землю [7].

В целом беспроводная передача электроэнергии пока не может заменить традиционные линии в магистральных сетях. Ее эффективность и безопасность ограничивают область применения. Однако для отдельных задач, связанных с мобильностью, удаленным питанием и космическими системами, беспроводные технологии могут стать важным дополнением к существующей энергетической инфраструктуре.

### **2.3. Газоизолированные линии**

Газоизолированные линии представляют собой высокотехнологичную альтернативу традиционным кабельным и воздушным линиям для передачи энергии при высоких и сверхвысоких напряжениях. Конструктивно такая линия является коаксиальной системой, в которой центральный проводник и внешний экран разделены изолирующей средой. В качестве изоляции применяются элегаз или газовые смеси, обладающие высокими диэлектрическими свойствами [3].

Газоизолированные линии отличаются высокой надежностью, компактностью и большой пропускной способностью. Они создают минимальное электромагнитное воздействие на окружающую среду и могут прокладываться в тоннелях, подземных коллекторах или внутри энергетических объектов. Благодаря этим свойствам такие линии подходят для ввода мощности в центры крупных городов, где строительство воздушных линий невозможно, а традиционные кабели не обеспечивают необходимую пропускную способность.

Основным ограничением газоизолированных линий является высокая стоимость оборудования и монтажа. Кроме того, использование элегаза связано с экологическими рисками, поскольку этот газ относится к сильным парниковым веществам. Поэтому современное развитие данной технологии

связано с поиском альтернативных газовых смесей, повышением герметичности оборудования и совершенствованием систем контроля утечек.

Газоизолированные линии можно рассматривать как нишевое, но стратегически важное решение. Их применение оправдано там, где требуется высокая надежность, компактность и большая передаваемая мощность при ограниченном пространстве. В отличие от массовых технологий, таких как воздушные линии, газоизолированные решения используются точечно, но их значение возрастает по мере уплотнения городской застройки и роста потребления электроэнергии.

### **Заключение**

Современная электроэнергетика использует широкий набор технологий транспортировки электроэнергии, каждая из которых имеет собственную область рационального применения. Воздушные линии остаются наиболее экономичным решением для магистральной передачи на больших расстояниях. Кабельные линии необходимы в городах, на промышленных площадках и подводных переходах. Системы постоянного тока высокого напряжения позволяют эффективно передавать большие мощности на дальние расстояния и соединять несинхронные энергосистемы.

Перспективные технологии, включая сверхпроводящие линии, беспроводную передачу энергии и газоизолированные линии, расширяют возможности энергетической инфраструктуры. Однако их внедрение зависит от снижения стоимости оборудования, совершенствования материалов, повышения безопасности и решения экологических вопросов. Наиболее рациональным подходом является не замена одной технологии другой, а их комплексное сочетание с учетом технических, экономических и территориальных условий.

Таким образом, развитие систем транспортировки электроэнергии должно основываться на балансе надежности, эффективности, экологичности и стоимости. Для магистральных сетей ключевыми направлениями будут повышение напряжения, развитие постоянного тока и цифровое управление

потоками мощности. Для городских сетей особое значение приобретут кабельные, сверхпроводящие и газоизолированные решения. Такое сочетание позволит обеспечить устойчивое энергоснабжение в условиях роста потребления и трансформации энергетики.

### **Литература**

1. Веников В.А., Харитонов В.П. Передача и распределение электрической энергии. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 456 с.
2. Обзор рынка высокотемпературной сверхпроводимости: аналитический отчет «ТЭК Росинфом». – 2022. – № 4. – С. 45-52.
3. Электрические системы и сети: учебник для вузов / под ред. В.А. Строева. – М.: Энергоатомиздат, 2012. – 592 с.
4. Arrillaga J., Liu Y., Watson N.R. Flexible Power Transmission: The HVDC Options. – John Wiley & Sons, 2007. – 350 p.
5. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J.D., Fisher P., Soljačić M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances // Science. – 2007. – Vol. 317, № 5834. – P. 83-86.
6. Massoud A.M., Ahmed S., Enjeti P.N., Tolbert L.M. Evaluation of a Hybrid Power Transmission System for Long-Distance Transmission // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – Vol. 28, № 2. – P. 669-680.
7. Shinohara N. Wireless Power Transfer via Radiowaves. – John Wiley & Sons, 2014. – 300 p.
8. Superconductivity for Electric Systems: U.S. Department of Energy Annual Report. – Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2021.

### **Literature**

1. Venikov V.A., Kharitonov V.P. Transmission and Distribution of Electric Energy. – Moscow: MPEI Publishing House, 2009. – 456 p.
2. Review of the High-Temperature Superconductivity Market: Analytical Report “TEK Rosinform”. – 2022. – No. 4. – P. 45-52.
3. Electrical Systems and Networks: Textbook for Higher Education Institutions / ed. by V.A. Stroev. – Moscow: Energoatomizdat, 2012. – 592 p.

4. Arrillaga J., Liu Y., Watson N.R. Flexible Power Transmission: The HVDC Options. – John Wiley & Sons, 2007. – 350 p.
5. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J.D., Fisher P., Soljačić M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances // Science. – 2007. – Vol. 317, No. 5834. – P. 83-86.
6. Massoud A.M., Ahmed S., Enjeti P.N., Tolbert L.M. Evaluation of a Hybrid Power Transmission System for Long-Distance Transmission // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – Vol. 28, No. 2. – P. 669-680.
7. Shinohara N. Wireless Power Transfer via Radiowaves. – John Wiley & Sons, 2014. – 300 p.
8. Superconductivity for Electric Systems: U.S. Department of Energy Annual Report. – Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2021.