



СОВРЕМЕННЫЕ ЛИНИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СВЯЗИ ЭНЕРГОСИСТЕМ СЕВЕРО-ЗАПАДА И КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ В УСЛОВИЯХ ЕЁ ВОЗМОЖНОЙ АВТОНОМНОЙ РАБОТЫ

М. Осыка, студент, maksim.osyka1@gmail.com
А.Ю. Никишин, доц., nikduke@klgtu.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

Рассмотрены особенности и история развития ЛЭП постоянного тока, а также изучены различные варианты схем их использования и проведен анализ. Сделаны выводы о политической и экономической целесообразности возможной прокладки ЛЭП постоянного тока, соединяющих Калининградскую и Ленинградскую области.

постоянный ток, линии электропередач, схемы передачи электроэнергии постоянного тока

Несмотря на то, что в наше время территории почти всех стран опутывают десятки тысяч километров ЛЭП переменного тока, история передачи электроэнергии на расстояние начинается именно линией с использованием постоянного тока, которую осуществил французский электротехник Ипполит Фонтен на выставке в Вене в 1873 г. [1]. Тогда, на заре становления электроэнергетики, развитие систем электроснабжения переменного и постоянного тока шло параллельно. Однако создание российским ученым М.О. Доливо-Добровольским первой линии электропередачи трехфазного тока предопределило выбор в пользу переменного тока [1].

Именно это направление было признано наиболее перспективной системой электроснабжения.

Тем не менее на протяжении XX века линии постоянного тока строились в разных частях земного шара, в том числе и в СССР. Особенно с конца 60-х годов, когда шведская компания ASEA (учредитель компании ABB) разработала мощные полупроводниковые вентили – тиристоры [2].

В настоящее время, после ста лет гегемонии линий электропередач переменного тока, внимание специалистов опять обратилось к электропередачам постоянного тока, так как они способны передавать большее количество энергии на длинные дистанции с меньшими капитальными затратами и меньшими потерями, чем на переменном токе. Кроме того, в системы постоянного тока легче встраиваются все возобновляемые источники электроэнергии (ветровые, солнечные и др.). С другой стороны, современные технические системы на базе компьютерной техники требуют источников питания постоянного тока [1]. Таким образом, мы наблюдаем возрождение систем постоянного тока (табл. 1).

Как видно из табл. 1, именно в последнее десятилетие наблюдается "экстремально" быстрый рост мощности, передаваемой ЛЭП постоянного тока, что можно объяснить строительством новых ЛЭП постоянного тока в Индии и Китае, на чью долю приходится почти 2/3 мощности действующих в настоящее время линий [2].

ПРИНЦИП РАБОТЫ ЛЭП ПОСТОЯННОГО ТОКА

Линия постоянного тока - это совокупность электроустановок, аппаратов и проводов, служащих для преобразования переменного тока в постоянный для дальнейшей его передачи на большое расстояние, с последующим его преобразованием в переменный. Чаще всего их используют для соединения независимых энергосистем, работающих в несинхронном

режиме, в подземном и подводном исполнении длиной более 50 км и в наземных соединениях длиной более 800 км.

Таблица 1 - Рост суммарной мощности ЛЭП постоянного тока

Период строительства ЛЭП	Суммарная установленная мощность, МВт
1960-69	1362
1970-79	9544
1980-89	13190
1990-99	7893
2000-09	22585
2010-19	193600

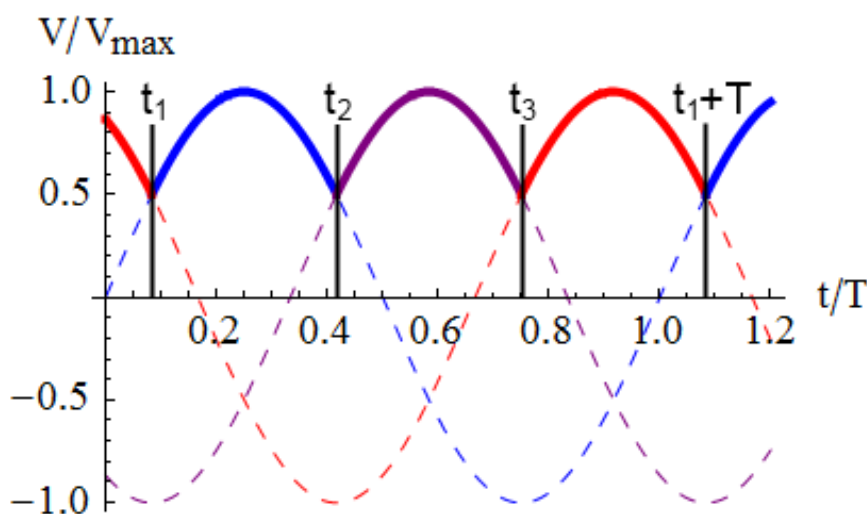


Рисунок 1 - Три источника переменного напряжения. Путем запуска тиристоров в моменты времени t_1 , t_2 и t_3 выпрямитель выдает выходной сигнал, который соответствует максимальному напряжению всех трех источников

Все последние ЛЭП основаны на технологиях швейцарской компании ASEA [2]. Как было сказано ранее, в основу устройств инвертирования и выпрямления положены полупроводники. Раньше это были ртутные выпрямители, а сейчас тиристоры. Тиристор можно представить как диод, только с управляемым электродом, включаемым по команде в определенно указанное время. Тем самым, обрезая часть синусоиды, мы получаем постоянный ток, как показано на рис. 1. Далее выпрямленное напряжение проходит через фильтры, или путем увеличения числа тиристоров полученное напряжение сглаживается, и гармонический состав улучшается. Таким же образом происходит и инвертирование постоянного тока в переменный [2].

ДЕЙСТВУЮЩИЕ СХЕМЫ ЛЭП ПОСТОЯННОГО ТОКА

На данный момент существует пять видов схем исполнения передач постоянного тока: монополярная, биполярная, вставка постоянного тока, мультитерминальная и трехполярная [3].

1. Монополярная схема представлена на рис. 2. Как видно из рисунка, один из полюсов выпрямителя и инвертора заземляется, а второй связан с линией электропередач. Ток протекает как по проводу, так и по земле. Также существует возможность передавать обратный ток не только по земле, но и по воде при морском базировании ППТ.

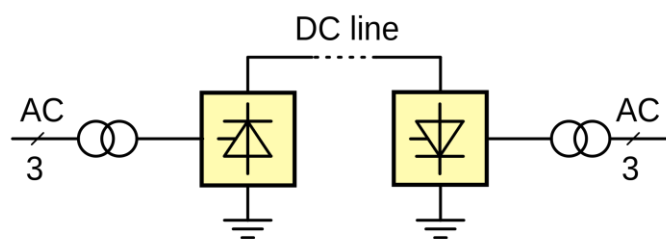


Рисунок 2 - Монополярная схема

Современные монополярные системы воздушной сети могут передавать до 1500 МВт. При использовании подземного или подводного кабеля обычное значение составляет 600 МВт.

2. Биполярная схема показана на (рис. 3). В биполярной схеме используют пару проводников противоположной полярности. Один из выводов заземлен, и через него протекают незначительные токи. В случае повреждения одной из линий система начинает работать в монополярном режиме и может передавать половину от номинальной мощности нагрузки. Для уменьшения влияния обратных токов в биполярной схеме могут использоваться неизолированные проводники в местах заземления.

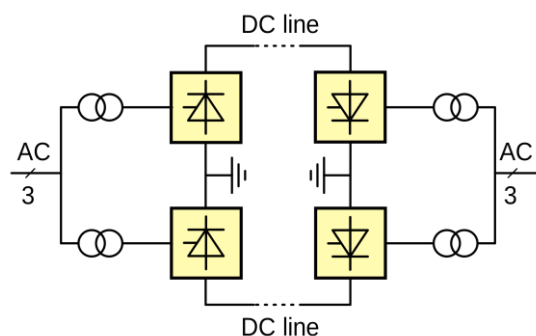


Рисунок 3 - Биполярная схема

3. Помимо электропередач постоянного тока получили распространение так называемые вставки постоянного тока, где выпрямитель и инвертор расположены на одной подстанции, а линия отсутствует. Такие вставки служат для связи примыкающих друг к другу систем переменного тока, как межгосударственные связи. Вставка постоянного тока представлена на рис. 4. Вставки постоянного тока сооружены в Канаде, Японии, США, Австрии. В России вставка введена в работу в 1981 г. и служит для связи энергосистем России и Финляндии.

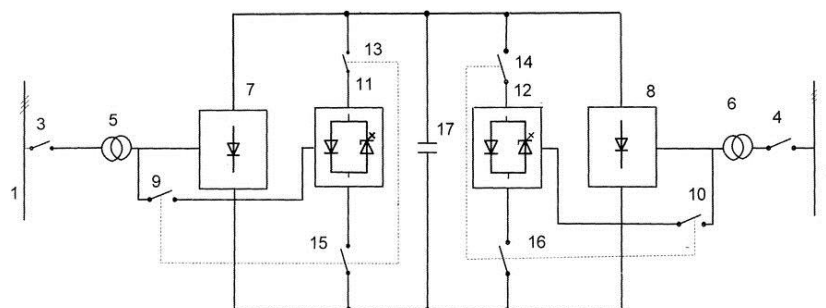


Рисунок 4 - Схема вставки постоянного тока

4. Мультитерминальные — это сложные линии, имеющие более двух пунктов. Они бывают последовательные, параллельные и гибридные (последовательно-параллельные). В настоящее время существуют всего две мультитерминальные линии. Например, система

Quebec-New England мощностью 2000 МВт, открытая в 1992 г., в настоящее время является крупнейшей мультитерминальной HVDC системой в мире [3].

5. Трехполярная линия представлена на рис. 5. Принцип функционирования тот же, что у биполярной схемы: две линии противоположной полярности, они работают в биполярном режиме, а третий проводник - параллельно в монополярном режиме. Он оборудован реверсными вентилями, которые действуют обратной полярности и уменьшают ток, периодически переключая полярность. Это помогает снизить среднеквадратичный нагрев, тем самым повышая пропускную способность. Возможно повысить эффективность до 80% существующих биполярных линий при том же напряжении и линиях [3].

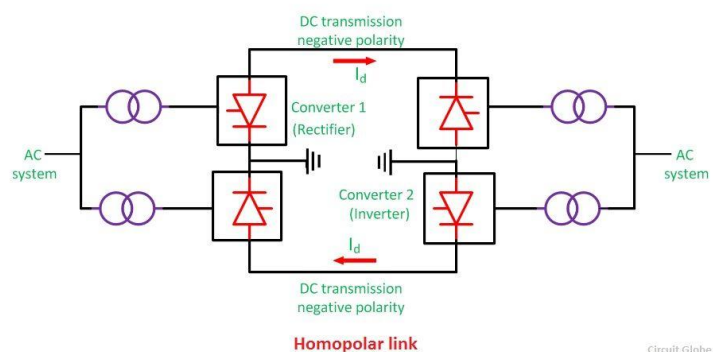


Рисунок 5 - Трехполярная схема

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СХЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В нашем исследовании мы проанализируем общее количество схем, спроектированных и построенных до 2019 г., данные представлены на рис. 6 [4].

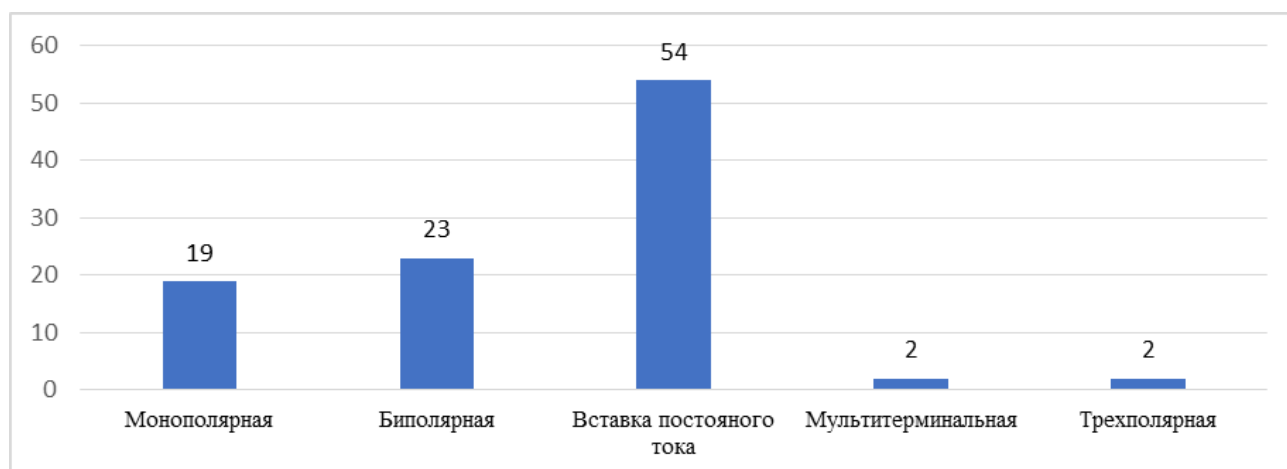


Рисунок 6 - Диаграмма, показывающая количество схем ЛЭП ПТ в мире

Как видно из рис. 6, чаще всего используются вставки постоянного тока, поскольку во многих странах энергосистемы работают несинхронно и вместе с тем имеется потребность в покупке и продаже электроэнергии. Монополярные и биполярные схемы используются примерно с одинаковой частотой, так как выбор их обуславливается экономической целесообразностью и технологическими особенностями. Если требуется провести линии большой мощности и на большую длину, выбирается биполярная схема, а в других случаях применяется более экономичная монополярная. Мультитерминальных и трехполярных линий пока только две, но существуют планы как в Китае, так в Индии по переводу биполярных линий в трехполярные.

На рис. 7 приведено сравнение схем по капитальным затратам на проект линий электропередач постоянного тока.



Рисунок 7 – Диаграмма стоимости 1 кВт установленной мощности ПТ

Необходимо учесть, что цифры, представленные как капитальные затраты, условные, так как все проекты отличаются и по протяжённости, и по проходной мощности. В нашей статье приведены усредненные данные по большинству построенных линий в мире [4]. Диаграммы показывают, что самый доступный вариант в экономическом плане - это монополярная схема, однако из-за своих структурных особенностей она отличается самой низкой надежностью. При аварийной ситуации повреждение единственного полюса выводит монополярную линию из строя на всё время устранения неисправности.

Капитальные затраты на сооружение бипольной схемы и её показатели надежности в два раза больше, чем у монополярной, что связано с добавлением одного полюса, а также с большей длиной линии и пропускной способностью [5].

Значительных капитальных затрат требует сооружение мультитерминальных систем. По сути это те же бипольные схемы, только более сложные по своей структуре, охватывающие огромные территории и соединяющие несколько удаленных точек. По уровню надежности они незначительно превышают бипольные, так как имеют больше линий связи.

Трёхполярные схемы дешевле мультитерминальных, однако дороже бипольных. Они обладают самым высоким уровнем надежности: авария одного из полюсов приводит к малым потерям производительности. Обратный ток не возникает в земле, тем самым повышет надежность системы и не требует времени на переключение [5].

ЛЭП ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА: ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

Главное отличие постоянного тока от переменного – это отсутствие индуктивного сопротивления, что значительно уменьшает количество потерь электроэнергии. Однако постоянный электрический ток предполагает потери на нагрев. Точное их определение зависит от технологии и уровня напряжения. Для высоких напряжений – около 3% на 1000 км [6].

Преобразовательные подстанции из-за сложного и дорогостоящего оборудования значительно увеличивают стоимость передач постоянного тока. В то же время, сама линия постоянного тока стоит дешевле, чем ЛЭП переменного тока, из-за меньшего количества проводов, изоляторов, линейной арматуры и более легких опор. Зависимость протяженности ЛЭП постоянного и переменного тока от стоимости строительства представлена на (рис. 8).

Поэтому выбор ЛЭП постоянного тока экономически оправдан при их очень большой длине, когда удорожание подстанций компенсируется удешевлением линии.

Экономическая граница применения передач переменного и постоянного тока лежит в диапазоне 800—1100 км для передач без промежуточных отборов мощности и 1100—1400 км для передач с промежуточными подстанциями в диапазоне мощностей от 600 до 3000 МВт [6]. Для кабельных линий ввиду высокой стоимости кабеля эта граница резко снижается и составляет 70—80 км [6].

Сегодня возможны системы передачи постоянного тока с напряжением до 800 кВ и пропускной способностью до 8000 мВт на расстояние более 2000 км [6].

Следует отметить, что прохождение обратного тока через землю и воду влечет за собой: коррозию находящихся в земле трубопроводов; выделение хлора, изменение состава морской воды; возникновение магнитного поля, влияющего на навигационное оборудование, проходящих над подводным кабелем. Путем установки неизолированного металлического обратного проводника между заземленными выводами устраняют негативные воздействия. Решение об использовании металлического обратного провода основывается на экономических, технических и экологических факторах.

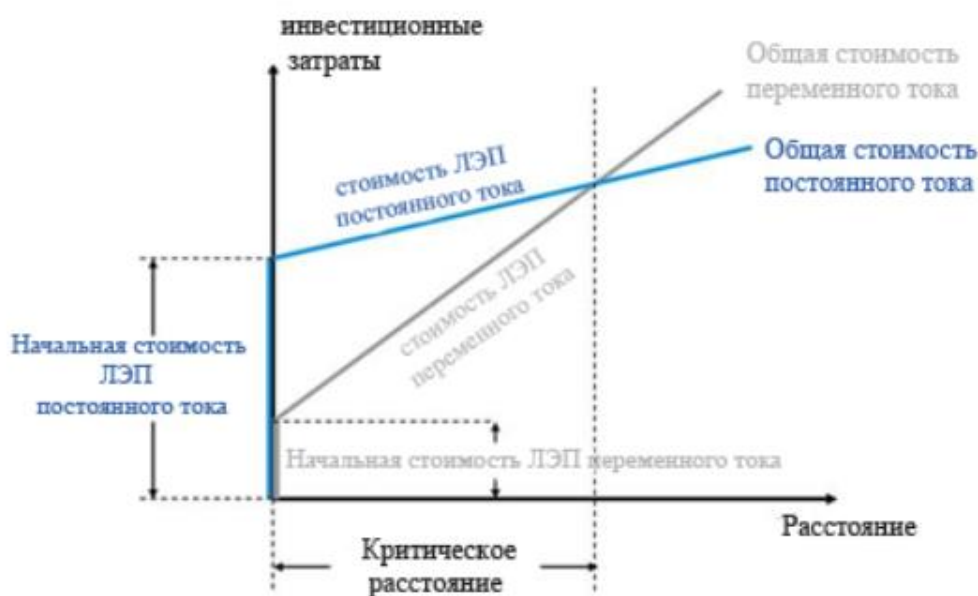


Рисунок 8 – График зависимости стоимости от длины линий

Естественный вывод из вышесказанного - не существует универсального варианта, подходящего для всех случаев. Нужная схема выбирается с учетом места расположения, пропускной способности и протяженности линии.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЭП ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И В КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Так как ЕЭС РФ состоит из множества систем, находящихся на значительном расстоянии друг от друга, возможно, пришло время обратить внимание на перспективы использования ЛЭП постоянного тока на территории России.

Строительство подобных ЛЭП помогло бы эффективно решить существующие проблемы в энергосистеме страны: соединение удаленных объектов генерации, удаленных офшорных нефтяных платформ в районах Крайнего Севера и Дальнего Востока, передача электроэнергии на острова, подключение возобновляемых источников энергии, таких как ветроэнергетические установки, а также проблему ограничения токов КЗ [7].

Поскольку использование традиционных ЛЭП на большие расстояния затрудняет создание синхронных связей с удаленными территориями, возможно реализовать такие проекты, как ЛЭП постоянного тока, между Калининградской и Ленинградской областями,

Урал – Средняя Волга – Центр и обеспечить режимные перетоки мощности. В период 2021-2030 гг. намечается сооружение ППТ ± 500 кВ Сибирь – Тюмень с пропускной способностью 2000 МВт и протяженностью 900 км [7].

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ СТРОИТЕЛЬСТВА ЛЭП ПОСТОЯННОГО ТОКА В КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Калининградская область является полностью отделённым от остальной территории страны регионом и не имеет сухопутных границ с другими регионами РФ. Её энергосистема долгое время была связана с Единой энергетической системой России через электрические сети энергосистем стран БРЭЛЛ. Но в связи с политикой ЕС в сфере энергетической безопасности страны Прибалтики приняли решение к 2025 г. выйти из БРЭЛЛ и присоединиться к энергосистеме ЕС, тем самым отрезав Калининградскую энергосистему от ЕЭС России. Правительством РФ был разработан план работы энергосистемы в изолированном режиме без связи с внешней энергосистемой.

Создание ЛЭП постоянного тока, проложенной по дну Балтийского моря, между Ленинградской и Калининградской областями позволит функционировать Калининградской энергосистеме как в изолированном (запланированном) на данный момент режиме, так и осуществлять связь с ОЭС северо-запада, таким образом получая необходимую мощность. Поскольку Калининградская область считается активно развивающимся регионом с постоянно растущим населением, предполагается увеличение потребности и в промышленных предприятиях, и в дальнейшем развитии сельского хозяйства, что повлечет за собой рост потребляемой электроэнергии. Кроме того, область является важным стратегическим регионом в военно-политическом плане, поэтому необходимо обеспечить ее гарантированную энергобезопасность. В перспективе возможна реализация таких проектов, как оффшорный ветропарк, атомная электростанция. Уже сейчас Калининградская область занимает одно из ведущих мест по уровню развития ВЭС в России. По последним данным, на долю Калининградской области приходится 1/3 выработки электроэнергии всех ВЭС по стране. По расчетам ветропотенциал Калининградской области может составлять до 300 МВт [8]. Это направление в электроэнергетике РФ фактически не развивалось до последнего времени, однако в связи с интересом к возобновляемым источникам энергии его следует признать перспективным, и Калининградская область является подходящей платформой для осуществления подобного проекта [8]. На данный момент в Калининградской области вырабатывается 1709 МВт электроэнергии [9], с учетом потенциальных возможностей развития ВЭС и атомной станции суммарная установленная мощность может достигнуть 3 ГВт.

Предполагается построить ЛЭП постоянного тока с напряжением 750кВ и проходной мощностью 2 ГВт, длиной 900 км между Ленинградской и Калининградской областями. Это выведет энергосистему Калининградской области на новый уровень, что позволит передавать излишки мощности по вставке постоянного тока в ЕЭС России.

На основании проведенного анализа эксплуатируемых в различных станах действующих линий постоянного тока наиболее перспективным вариантом в нашем случае представляется использование биполярной схемы.

ВЫВОД

В последнее десятилетие во всем мире мы наблюдаем всё возрастающий интерес к перспективам использования ЛЭП постоянного тока. Это связано с активным развитием высоковольтной полупроводниковой техники. Цена на комплектующие систем передачи постоянного тока падает, и уже сейчас передавать электроэнергию на большие расстояния выгоднее, используя ЛЭП постоянного тока. Россия как страна, обладающая обширными территориями, просто обязана использовать эти технологии. Не только для оптимизации и технологического развития своей энергосистемы на мировом уровне, но и в стратегических

целях: для обеспечения энергобезопасности удаленных территорий (таких как Калининградская область) и создания единой эффективно функционирующей системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Микеров, А. / Война токов и победа переменного тока А. Микеров // Control engineering Россия #2 (68): электронный научный журнал. – 2017 [Электронный ресурс]. <https://controleng.ru/wp-content/uploads/68100.pdf> (дата обращения: 28.11.2019).

2. Гуннар Асплунд, / HVDC АББ – от пионера до мирового лидера, //АВВ Ревю 4. – 2008 [Электронный ресурс]. <https://docplayer.ru/44659427-Hvdc-abb-ot-pionera-do-mirovogo-lidera-gunnar-asplund-lennart-karlsson-vsegda-v-pervyh-ryadah.html> (дата обращения: 28.11.2019)

3. Ушаков, В.Я. Электроэнергетические системы и сети: учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры / В. Я. Ушаков. — Москва: Издательство Юрайт, 2016. — 446 с. — Серия : Университеты России

4. Wikipedia contributors, List of HVDC projects, Wikipedia, The Free Encyclopedia, - 17 November 2019 [Электронный ресурс]. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_HVDC_projects (дата обращения: 26.11.2019)

5. Веников, В.А. Электрические системы. Т.3. Передача энергии переменным и постоянным током: учеб. пособие для электроэнергет. вузов / В.А. Веников, В.В. Худяков, Н.Д. Анисимова; под ред. В.А. Веникова. – Москва: Высш. шк., 1972. – 368 с.

6. Интернет-энциклопедия про всё, что связано с домашней электрикой: выключатели, розетки, лампочки, люстры, проводка. Советы, инструкции и наглядные примеры. - 2019 [Электронный ресурс]. <https://jelectro.ru/teoriya/postoyannyjj-i-peremennyjj-tok.html> (дата обращения: 25.11.2019)

7. Концепция развития электропередач вставок постоянного тока в ЕЭС России. – Санкт-Петербург: ОАО «НИИПТ», 2016. – 27 с.

8. Белей, В. Ф. Современные ветроэнергетические установки в составе электроэнергетической системы / В. Ф. Белей, А. Ю. Никишин // Энергия единой сети. - 2013. - №5. – С. 60-69; ВЭ-5.

9. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Калининградской области на 2020-2024 годы. – Москва: АО «Научный-технический центр единой энергетической системы», 2019. – 272 с.

MODERN DC LINES AND PROSPECTS FOR APPLICATION OF TECHNOLOGY FOR COMMUNICATION OF POWER SYSTEMS OF THE NORTH-WEST AND KALININGRAD REGION IN THE CONDITIONS OF ITS POSSIBLE AUTONOMOUS WORK.

M. Osyka, student, maksim.osyka1@gmail.com
A.Y. Nikishin, Associate Professor, nikduke@klgtu.ru
Kaliningrad State Technical University

In this article, we will consider the features and history of the development of direct current power lines, as well as study various options for their use and analyze. Conclusions will be made on the political and economic feasibility of the possible construction of a direct current power line connecting the Kaliningrad and Leningrad regions.

direct current, power lines, direct current power transmission schemes