

## К вопросу создания высоконадежных кабельных сетей постоянного тока

**Р. Н. Шульга,**

Всероссийский электротехнический институт,  
ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук

Выполнен анализ технических решений по построению высоконадежной кабельной сети постоянного тока напряжением 10 кВ мощностью 10 МВт. Показана возможность выполнения кабельных сетей постоянного тока с использованием ранее разработанных опытных образцов преобразователей, выключателей, кабелей и защитных устройств. Рассмотрены проблемы формирования основных элементов применительно к спецобъектам и объектам гражданского назначения. Целесообразна реализация пилотного проекта кабельной сети постоянного тока для отработки алгоритмов управления и защиты, выбора типов оборудования и оценки надежности комплекса.

**Ключевые слова:** кабельная сеть, постоянный ток, преобразователь, выключатель, управление, защита.

Понимание необходимости повышения надежности энергоснабжения вызвало в последнее время значительный интерес к применению кабельных сетей постоянного тока. Появились проекты кабельных сетей постоянного тока напряжением до 200–300 кВ, длиной в сотни и тысячи километров с использованием подземных и подводных полиэтиленовых кабелей. Для стран, имеющих большую территориальную протяженность, актуально использование воздушных сетей постоянного тока напряжением до 1000 кВ [1].

Ключевыми элементами кабельных сетей постоянного тока (КСПТ) являются кабельные линии, преобразователи тока и напряжения, выключатели постоянного тока, системы управления, регулирования, защиты и автоматики. В зарубежной практике указанные элементы отработаны достаточно хорошо, за исключением на данный момент выключателей постоянного тока, которые предполагается делать гибридными с применением механических ключей и приборов, опытные образцы которых на напряжение 120 кВ, ток отключения 10 кА, время отключения до 5 мс разработаны (например, [2]), но являются дорогостоящими, габаритными и недостаточно надежными, что препятствует их распространению. В отечественной практике разработаны и находят применение конденсаторные выключатели постоянного тока с использованием воздушных камер и индукционного привода на напряжение до 20 кВ, ток до 2 кА, время отключения до 5 мс, которые достаточно дешевы, надежны и малогабаритны [3].

Среди кабелей для сетей для постоянного тока конкурируют кабели с бумажной пропитанной изоляцией и с полиэтиленовой изоляцией. Первые широко используются и обладают существенными преимуществами при постоянном токе с точки зрения электрической прочности, пропускной способности, самоликвидации одиночных замыканий на землю и стоимости по сравнению с СПЭ-кабелями. С другой стороны, вторые обладают целым рядом

преимуществ по температуре, радиусу изгиба, передаче больших мощностей, надежности, нераспространению горения, хотя и более критичны к импульсным перенапряжениям, необходимости ликвидации объемного заряда в изоляции и др. [5, 6].

Что касается систем управления и защиты (СУРЗА), намечились существенные изменения, которые свидетельствуют о переходе к третьему поколению мультиагентных самообучаемых систем управления, которые придут на смену первому поколению АСУТП, не справившемуся с проблемой размерности, а также второму поколению в виде «умных» систем, не справившемуся с проблемой резервируемости.

Основные элементы КСПТ будут подробнее рассмотрены ниже.

Принципы создания КСПТ (10 кВ, 10 МВт) включают распределенность генерации, применение подземных СПЭ-кабелей на постоянном токе, использование статических преобразователей тока и напряжения, конденсаторных выключателей постоянного тока, оборудование в подземных контейнерах с высоковольтными разъемами и амортизаторами. КСПТ может выполняться в кольцевой или смешанной топологии с реализацией в биполярной схеме. Число ветвей в одном узле должно быть не менее трех, как показано на рис. 1.

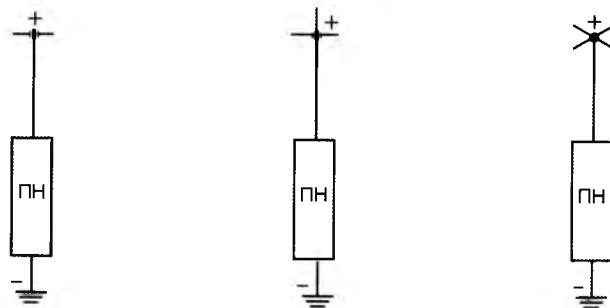


Рис. 1. Узлы кабельной сети постоянного тока с разным числом ветвей (2–4)

На рис. 2 показана реализация кольцевой биполярной трехпроводной КСПТ, содержащей кабели с полиэтиленовой или бумажно-пропитанной изоляцией, преобразователи напряжения и выключатели в каждой ветви (на схеме не показаны). При коротком замыкании или нарушении работы в любой из ветвей время отключения не более 5 мс. Одновременно с отключением одного полюса другой полюс форсируется по току на величину и длительность, допускаемые перегрузкой преобразователей напряжения и кабелей. Работа сети в целом остается неизменной. После устранения нарушения выключатели аварийной

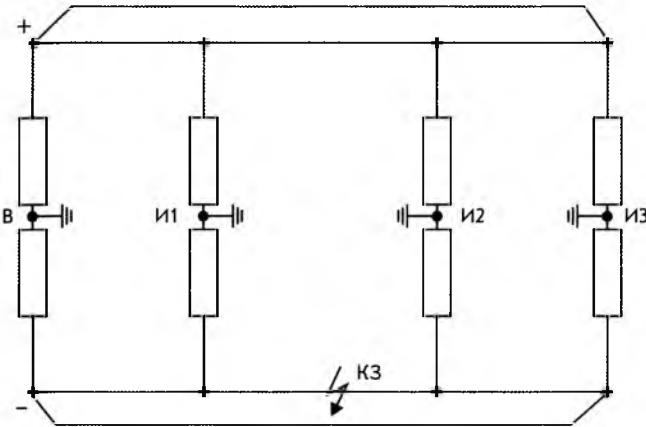


Рис. 2. Преобразование двухполюсной передачи постоянного тока в КСПТ

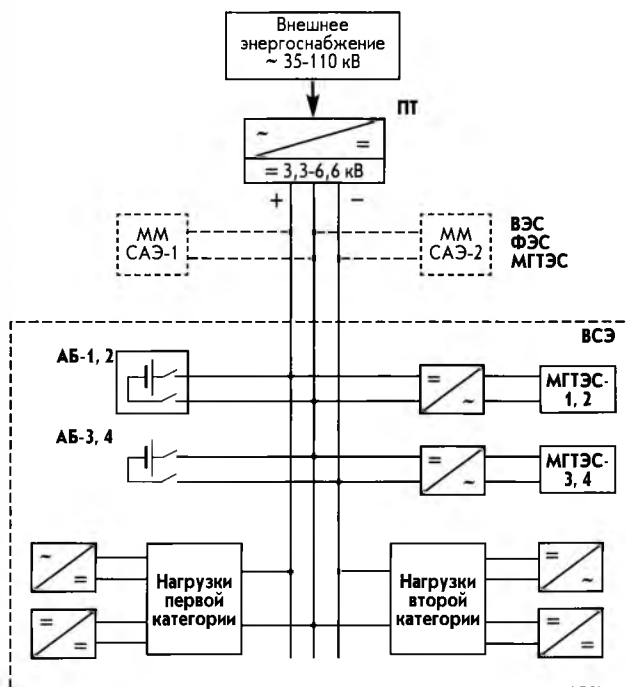


Рис. 3. Структура системы энергоснабжения на постоянном токе:

**ВЭС, ФЭС, МГТЭС** – соответственно ветро-, фото- и микрогазотурбинные электростанции;  
**ММСАЭ** – мобильные модульные системы автономного энергоснабжения;  
**ВЭС** – высоковольтная система электроснабжения

ветви возвращают ее в исходное состояние. При этом возврат целесообразно осуществлять плавно с помощью автоматики ПИР для снижения перенапряжений.

СУРЗА в составе сети строится по мультиагентному принципу, то есть каждая локальная система управления узла автоматически отключает ветвь по признакам защиты в шаблоне обучения (снижению напряжения или другим комбинированным настройкам в процессе обучения от математической модели реального времени). Снижение времени отключения до 5 мс позволяет повысить ресурс кабелей и силовых полупроводников преобразователей напряжения.

Структура системы энергоснабжения на постоянном токе изображена на рис. 3.

### Кабельные линии

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на переменном токе напряжением 6–35 кВ обладают существенными преимуществами по отношению к кабелям с бумажно-пропитанной, масломполненной или резиновой изоляцией с точки зрения пропускной способности (в 1,5 раза), допустимой температуры (90 °С против 70 °С), радиуса изгиба (в 2–3 раза), массогабаритных показателей, срока службы, температуры укладки (до –20 °С), экологичности, хотя и являются более дорогими в производстве. СПЭ-кабели выпускаются в широком диапазоне напряжением до 500 кВ. Рекомендуются для испытаний кабелей среднего напряжения в соответствии с МЭК 60502-2, CENELEC HD 620 воздействием напряжения  $3U_{ном}$  длительностью 30 мин. частотой 0,1 Гц вместо испытаний повышенным (4–10-кратным) напряжением постоянного тока длительностью 15 мин., применяемым для остальных типов кабелей. В СПЭ-кабелях возможно нарушение изоляции из-за наличия ионизации и объемного заряда внутри изоляции, что проявляется в виде триингов, а также появление скользящих разрядов в наружной изоляции кабеля и кабельных муфт, являющихся более слабыми в электрическом отношении элементами кабельных линий.

На переменном токе из-за наличия зарядной мощности кабельных линий их длина ограничена примерно 30 километрами. Неконтролируемые перетоки реактивной мощности обуславливают дополнительные потери; между токопроводящей жилой и экраном, а также оболочкой возникают наведенные токи до десятков ампер. Для кабеля постоянного тока единственным источником теплоты являются потери в жиле  $\Delta P_{ж}$ , Вт/м, которые определяются формулой:

$$\Delta P_{ж} = I^2 R_{ж}, \quad (1)$$

где  $I$  – ток жилы;

$R_{ж}$  – активное сопротивление жилы на постоянном токе при заданной температуре, Ом/м.

Для кабеля переменного тока наряду с потерями в жиле  $\Delta P_{ж}$  с учетом вихревых и поверхностных токов возникают диэлектрические потери в изоляции  $\Delta P_{из}$  и потери в оболочке  $\Delta P_{об}$  [5]. Потери в изоляции определяются по формуле:

$$\Delta P_{из} = U_{\phi}^2 \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (2)$$

где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение, В;  
 $\omega = 314$  рад/с – угловая частота;  
 $C$  – погонная емкость кабельной линии, Ф/м;  
 $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь.

Для кабельных линий среднего напряжения значение  $U_{\phi}$  довольно мало;  $\operatorname{tg} \delta$  для СПЭ-изоляции равен 0,0008, для бумажной пропитанной изоляции  $\operatorname{tg} \delta = 0,008-0,015$ , следовательно, диэлектрическими потерями можно пренебречь. Для расчета допустимого тока нагрузки определяется термическое сопротивление изоляции  $R_{тиз}$ , которое для круглого сечения жилы рассчитывается по формуле:

$$R_{тиз} = \sigma_{из} \ln(r_{из}/r_{ж})/2\pi, \quad (3)$$

где  $\sigma_{из}$  – удельное термическое сопротивление изоляции. Значение  $\sigma_{из}$  для СПЭ составляет 3,5 К·м/Вт, для остальных видов изоляции (резина, поливинилхлорид, бумага с пропиткой) 5–6 К·м/Вт;  
 $r_{из}, r_{ж}$  – внешний радиус изоляции и радиус жилы.

Допустимая температура нагрева изоляции СПЭ в зависимости от класса напряжения достигает 70–90 °С, кратковременно 130 °С, а при коротком замыкании 250 °С. Для остальных видов изоляции длительно допустимая температура составляет от 65 до 85 °С при кратковременном повышении от 65 до 160 °С, а при коротком замыкании 200 °С [6, 7].

Погонное индуктивное сопротивление кабельных линий 6–220 кВ в 2–4 раза меньше, чем у воздушных того же класса напряжения (0,4 Ом/км). Погонная емкостная проводимость и зарядная мощность кабельных линий отличаются по сравнению с воздушными еще в большей степени из-за влияния диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , которая для бумажной пропитанной изоляции составляет 3,5–3,7, для СПЭ  $\epsilon = 2,2-2,3$ . В результате зарядная мощность и емкостная проводимость кабельных линий в 8–10 раз превышают параметры воздушных линий аналогичных классов напряжения. Погонные активные сопротивления кабельных линий 6–35 кВ с изменением сечения жилы 10–240 мм<sup>2</sup> варьируются от 1,84 до 0,077 Ом/км для меди и от 3,1 до 0,129 Ом/км для алюминия. Погонные индуктивные сопротивления  $x_0$  изменяются от 0,11 до 0,071 Ом/км, а зарядная мощность от 2,3 до 13 кВАр/км (значение для линий 6 кВ). Величина, обратная добротности кабельных линий 6–10 кВ, определяемая значением  $\nu_0 = r_0/x_0$ , составляет (17–1,0) для меди и (28–1,7) для алюминия для сечения жил от 10 до 240 мм<sup>2</sup>. Для маслонаполненных кабельных линий 110–220 кВ так же, как для воздушных аналогичных классов напряжения, значение  $\nu_0$  равно

0,6–0,2. Для кабельных линий СПЭ с алюминиевыми жилами 0,8–0,4 [8].

Эксплуатация отечественных СПЭ-кабелей среднего напряжения показала их повреждаемость на уровне кабелей с бумажной изоляцией, а иногда и выше, что может быть вызвано неверным выводом жилы и/или экрана, схемы заземления экранов, ошибочным испытанием повышенным постоянным напряжением, несоответствием характера заземления нейтрали, некачественным монтажом муфт и др. [6, 7]. СПЭ-кабели зарубежного производства предназначены для эксплуатации в сетях среднего напряжения с глухим или резистивным заземлением нейтрали, которые не дают повышения напряжения на неповрежденных фазах при однофазных коротких замыканиях.

В кабельных линиях постоянного тока не применяются экраны, что упрощает изготовление, монтаж, ремонт кабеля, снижает потери и стоимость изготовления. Если на переменном токе дефекты изоляции определяются ионизацией, объемным зарядом и поверхностными дефектами кабельных линий, то на постоянном токе остаются только два последних фактора, протекание же тока в жиле сопровождается меньшими потерями и тепловыделением. Кратность перенапряжений и сверхтоков в кабельных линиях постоянного тока за счет регуляторов тока существенно ниже и достигает 1,5–2-кратных значений по току (против 8–10-кратных на переменном токе). Кратность перенапряжений не превышает 2 против 4-кратных на переменном токе за счет применения автоматики ПИР, регуляторов напряжения и ограничителей перенапряжения. В результате условия работы изоляции на постоянном токе более благоприятные, что обуславливает ее большую надежность и долговечность.

Полученные за последние годы результаты по снижению влияния объемного заряда в СПЭ-кабеле за счет применения минеральных наполнителей приводят к тому, что один и тот же кабель, выдерживающий на переменном токе уровень напряжения 154 кВ, соответствует напряжению 250 кВ постоянного тока. Расчетным режимом для кабелей постоянного тока является наложение на постоянное напряжение импульса противоположной полярности. Например, для бумажно-масляной изоляции толщиной 12 мм за счет наличия бумаги при рабочей напряженности  $E = 20-25$  МВ/м электрическая прочность кабеля соответствует 120 МВ/м (отношение 4–5 о. е.). Для маслонаполненного кабеля при рабочей напряженности  $E = 40$  МВ/м электрическая прочность равна 80 МВ/м (отношение 2 о. е.).

### Преобразователи тока и напряжения

Если отечественные преобразователи тока на основе тиристоров и фототиристоров достаточно освоены промышленностью, достигают параметров по напряжению до 8 кВ, по току до 6 кА и сопоставимы с зарубежными на шайбе 150 мм, то приборы IGBT для преобразователей напряжения заведомо отстают от зарубежных образцов. Схемотехника

преобразователей напряжения за последние годы существенно видоизменилась с освоением технологий СТАТКОМ и ММС.

Преобразователи с естественной коммутацией представляют собой преобразователи (выпрямители или инверторы), собранные по трехфазной мостовой схеме с использованием тиристоров или фототиристоров. В настоящее время этот тип преобразователей имеет наиболее широкое применение в области построения сетей постоянного тока. Применение последовательного соединения тиристоров (фототиристоров) позволяет создавать тиристорные вентили для преобразовательных мостов с выпрямленным напряжением в несколько сотен кВ и выпрямленным током до 3–3,5 кА.

Преобразователи с емкостной коммутацией – это преобразователи, в которых коммутирующий конденсатор (или батарея) включены последовательно с вентильной обмоткой преобразовательного трансформатора и вентильным мостом. Обычно такая схема используется в тех случаях, когда преобразователь подключается к слабой системе или требуется повышенная устойчивость к посадкам напряжения в приемной системе.

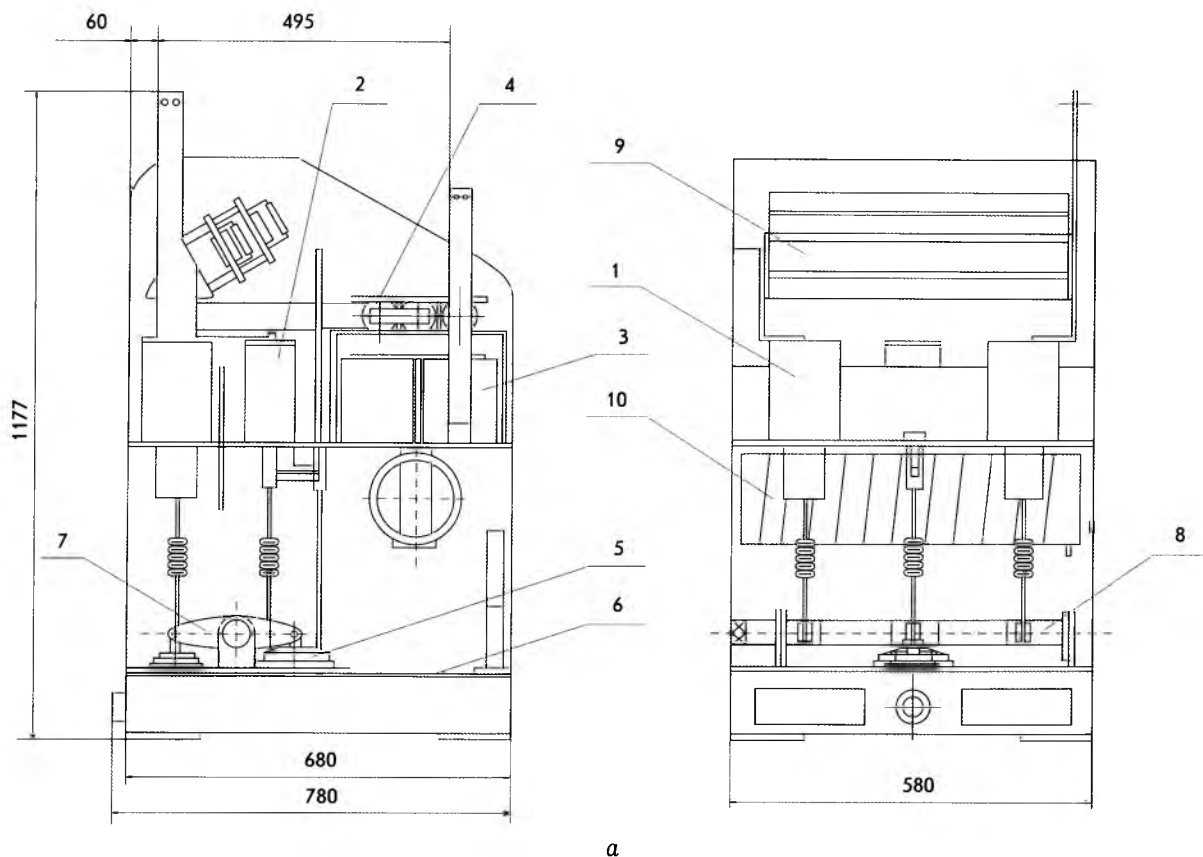
Тип преобразователей с принудительной коммутацией используется при передаче электроэнергии в пассивную (не имеющую генерирующих мощностей) сеть или когда необходимо регулировать активную и реактивную мощности [8, 9]. В этих преобразователях используются полностью управляемые вентили на основе полупроводниковых приборов, способные не только включать, но и прерывать ток. Преобразователи на их основе обычно работают в

режиме широтно-импульсной модуляции, что дает возможность независимо регулировать частоту, фазу и амплитуду выходного напряжения и обеспечивать независимое регулирование активной и реактивной мощности. Применяются либо в виде СТАТКОМа с ШИМ-модуляцией, либо в виде многоуровневых модульных конвертеров.

### Конденсаторные выключатели постоянного тока

Отечественные выключатели вполне соответствуют требованиям создания КСПТ среднего напряжения. В частности, в ВЭИ в результате многолетних исследований разработана линейка выключателей постоянного тока для железнодорожного транспорта на 4 кВ, кабельных сетей напряжением 10, 15, 20 кВ, для ускорителей и для накопителей электроэнергии на напряжения до 200 кВ и коммутируемые токи до 50 кА.

На рис. 4 а, б приведены габаритный чертеж и принципиальная схема конденсаторного DC-выключателя: 1 – вакуумная дугогасительная камера основного контура, 2 – вакуумная дугогасительная камера противотока, 3 – конденсатор, 4 – индуктивность, 5 – индукционно-динамический привод, 6 – опорная плита, 7 – рычаг, 8 – вал, 9 – диодный блок, 10 – дроссель, 11 – зарядное устройство. Характеристики указанного выключателя постоянного тока типа ВПТВ-15-5/400: номинальное напряжение 15 кВ (максимальное 20 кВ), номинальный ток 400 А, ток отключения 5 кА, время отключения 3–7 мс, время включения менее 100 мс, коммутационная стойкость 10 тыс. коммутаций, срок службы 10 лет.



а

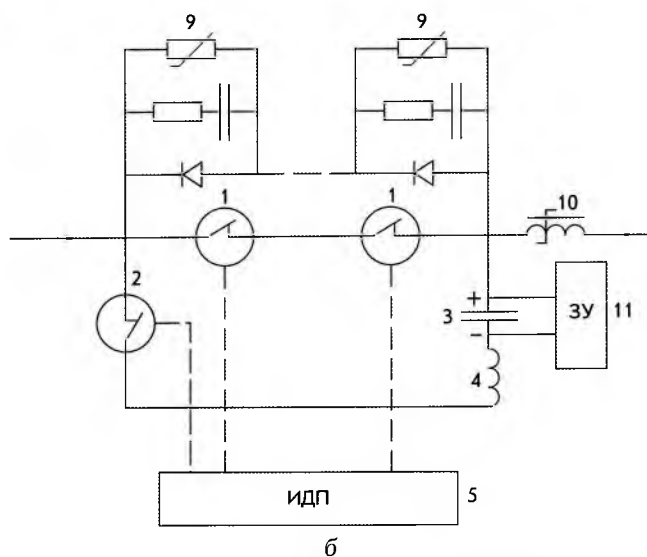


Рис. 4. Конденсаторный активный DC-выключатель [3]:

а — габаритный чертеж,  
б — принципиальная схема

Если зарубежные КСПТ высокого напряжения строятся на базе преобразователей напряжения и кабелей большой протяженности, которые могут изменять полярность рабочего напряжения, то отечественные КСПТ для нужд городов и спецобъектов должны быть среднего напряжения (до 20 кВ), с небольшими длинами линий и содержать преимущественно преобразователи тока. Реализация таких сетей требует не столько быстродействия, сколько недорогих и малогабаритных DC-выключателей, что вполне реализуемо на существующей базе вакуумных дугогасительных камер 6, 10, 35 кВ, индукционно-динамических приводов и дешевых электрических элементов. Энергоемкость используемых ограничителей перенапряжения должна составлять десятки кДж в зависимости от протяженности

кабельных линий и уровня рабочего напряжения, что позволит снять ограничения по их термической стойкости и времени охлаждения.

Выполненный анализ технических решений по созданию высоконадежных кабельных сетей постоянного тока показал возможность их создания на напряжения 10–20 кВ и мощность 10–20 МВт применительно к спецобъектам и объектам гражданского назначения. Повышение надежности КСПТ достигается комплексом схемотехнических решений в виде кольцевой или смешанной топологии, применением биполярных (трехпроводных) кабельных линий, использованием преобразователей напряжения на полностью управляемых вентилях, установкой на всех присоединениях конденсаторных выключателей постоянного тока с вакуумными дугогасительными камерами и индукционными приводами, разработкой мультиагентной системы управления и защиты с применением математической модели в реальном масштабе времени. Разработанные опытные образцы преобразователей, выключателей, кабелей и защитных устройств позволяют реализовать пилотный проект кабельных сетей постоянного тока путем отработки оборудования в составе испытательного центра ВЭИ. Выполнены опытные разработки оборудования в виде преобразовательных модулей на фототиристорах напряжением 20 кВ, током 3 кА, конденсаторных выключателей постоянного тока напряжением до 20 кВ постоянного тока, устройств защиты от импульсных перенапряжений и др., которые могут являться основой построения высоконадежных кабельных сетей постоянного тока.

Основными задачами реализации должны являться отработка алгоритмов и структуры системы управления и защиты, выбор типов оборудования, способов и средств защиты, оценка технико-экономических показателей и уровня надежности комплекса.

## Литература

1. Баринов В. А., Исаев В. А., Лисицын Н. В., Маневич А. С., Усачев Ю. В. Развитие электроэнергетики и единой национальной электрической сети России (долгосрочная перспектива) // Энергия единой сети. – 2017. – № 2. – С. 50–60.
2. Erikson T., Backman M., Halen S. A low loss mechanical HVDC breaker for HVDC grid and application proceedings of the CIGRE Paris Session, Paris, 2014.
3. Выключатель постоянного тока вакуумного типа ВПТВ-15-5/400. ТУ 16-674.068-86.
4. Сулова О. В., Шульга Р. Н. Техничко-экономические характеристики преобразовательных подстанций для электропередач и вставок постоянного тока // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2017. – № 76. – С. 125–139.
5. Электротехнический справочник. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под ред. В. Г. Герасимова. – Т. 3. – М.: МЭИ, 2004. – 964 с.
6. СТО 56947007-29.060.20.103-2011. Силовые кабели. Методы расчета устройств заземления экранов, защиты от перенапряжений изоляции силовых кабелей на напряжение 110–500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена.
7. Лавров Ю. А. Преимущества и недостатки изоляции из сшитого полиэтилена [Электронный ресурс]. Код доступа: [www.newchemistry.ru/printletter.php?n\\_id=6734](http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=6734).

8. Reed G., Pape R., Takeda M. Advantages of voltage sourced converter (VSC) based design concepts for FACTS and HVDC-link application. Proceedings of 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2003, vol. 3, pp. 1816–1821. <https://doi.org/10.1109/PES.2003.1267437>.

9. Степичев М. М., Шульга Р. Н. Предложения по построению распределенной генерации с использованием мультиагентных сетей постоянного тока // 3-я Всероссийская научно-техническая конференция Военной академии РВСН им. Петра Великого. – Московская обл., г. Балашиха, 2017. – С. 46–57.

#### On highly reliable DC-cable systems

**R. N. Shulga,**

*All-Russian Electrotechnical Institute, senior researcher, PhD*

*Increased renewable energy integration and reliability requirements have led to the construction and development of new DC-cable systems. DC lines involve lower capital costs and lower energy losses in long distance power transmission. In this paper, the current feasibility and state-of-the-art of DC cable transmission systems and components are reviewed. Types of equipment, such as converters, switchgear, control and protection devises, applicable for development of DC-cable systems are analyzed. As the characteristics of dielectric materials typically lead to electrical, mechanical, and thermal performances in cables, therefore the main types of applicable cables are briefly described.*

**Keywords:** *cable system, direct current, converter, switch, control, protection.*