

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВЕНТИЛЬНОГО БЛОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО МОСТА ВЫБОРГСКОГО КОМПЛЕКСА

АВТОРЫ:

М.В. ПЕШКОВ,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

В.Н. КАРПОВ,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Н.А. АЛЕКСЕЕВ,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

А.М. МАТИНЯН,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Выборгский преобразовательный комплекс — крупнейший объект постоянного тока в России. Он представляет собой вставку постоянного тока на тиристорных преобразователях тока с возможностью

передачи до 1300 МВт. ВПК был построен для экспорта электроэнергии из СССР в Финляндию. Эксплуатация началась в 1981 г. В настоящее время через ВПК из России в Финляндию ежегодно экспортируется порядка 6–7 ТВт·ч электроэнергии.

Ключевые слова: Выборгский преобразовательный комплекс; вставки и передачи постоянного тока; опытно-промышленная эксплуатация.



Внешний вид высоковольтного тиристорного модуля блока вентильного преобразовательного моста (ВТМ БВПМ-М)

ВВЕДЕНИЕ

Выборгский преобразовательный комплекс (ВПК) представляет собой четыре параллельно включенные вставки постоянного тока на тиристорных преобразователях тока — комплектных вентильных преобразовательных устройств

(КВПУ). ВПК (рис. 1) обеспечивает несинхронную связь энергосистем России и Финляндии с передачей до 1300 МВт энергии с возможностью реверса [1, 2].

Пропускная способность одного КВПУ составляет 350 МВт. Напряжение звена постоянного тока КВПУ

равно ± 85 кВ. Преобразователи тока КВПУ выполнены по двенадцатипульсовой мостовой схеме, включающей два шестипульсовых моста (рис. 2). Каждый мост конструктивно разделен на три фазы, называемые «блоки вентильные преобразовательного моста» (БВПМ). БВПМ состоит из двух высоковольтных тиристорных вентилей (ВТВ), объединенных в рамную конструкцию опорного типа (рис. 3) [3]. ВТВ старой конструкции состоит из 16 высоковольтных тиристорных модулей (ВТМ), соединенных последовательно и размещенных в ячейках рамной конструкции БВПМ.

Оборудование ВПК вводилось в работу поэтапно, начиная с 1981 г., когда было запущено комплектное вентильное преобразовательное устройство № 2 (КВПУ-2 П). Далее, в 1982 г. было запущено КВПУ-1 П, в 1984 г. — КВПУ-3 П, в 2000 г. — КВПУ-4 П. Назначенный ресурс, для преобразовательных блоков типа БВПМ-800/120 составляет 25 лет. Преобразовательное оборудование КВПУ 1 П, 2 П и 3 П выработало свой назначенный ресурс, и требуется его замена на новое.

На ПС 400 кВ «Выборгская», начиная с 2013 г., установились сложные режимы работы КВПУ, связанные с увеличением периодов полного отсутствия передачи электроэнергии, но в то же время рампинг (изменение графика от часа к следующему часу) вырос в два раза и стал достигать 600 МВт.

Такие условия работы негативно отразились на устаревшем оборудовании КВПУ и привели к росту числа плановых отключений для ремонта.

В связи с вышеизложенным актуальной стала задача разработки вентильного оборудования для реконструкции преобразовательного комплекса вставки постоянного

СХЕМА ВПК

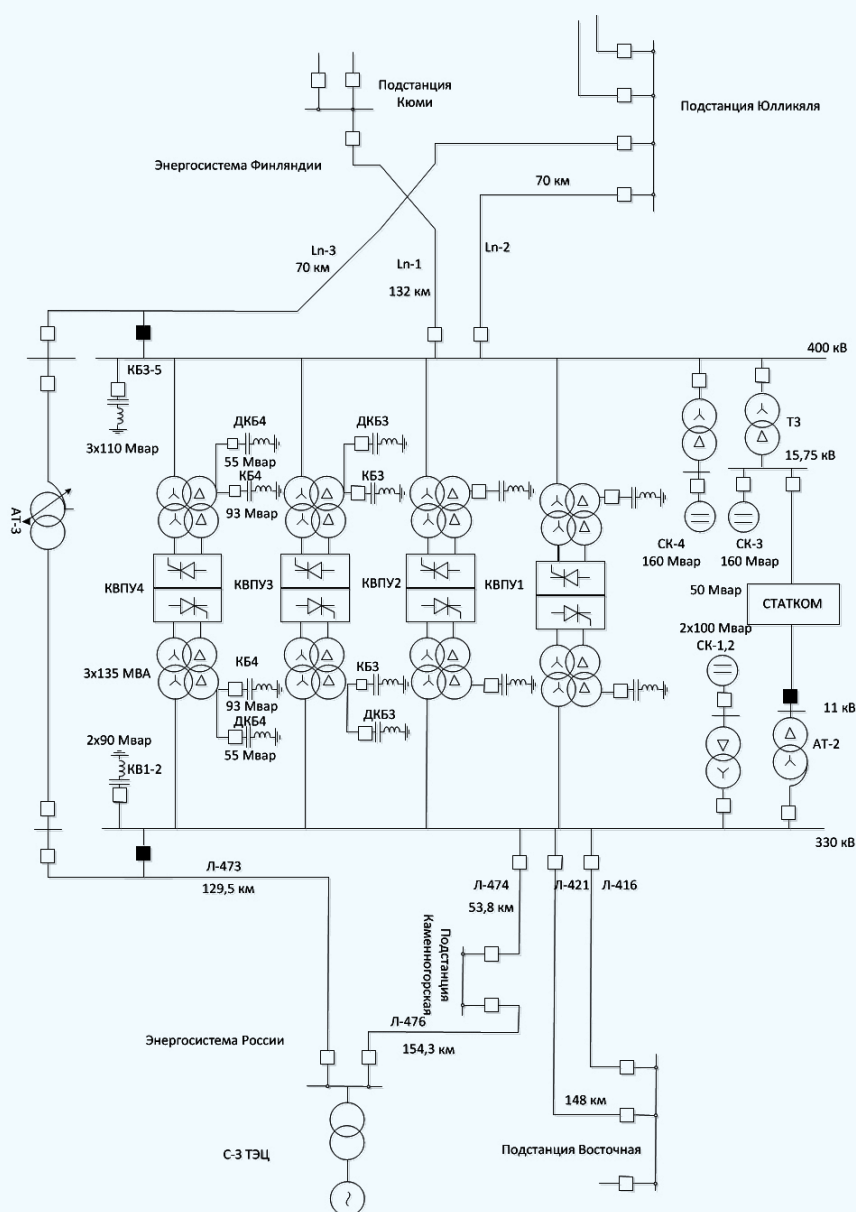


Рис. 1

СХЕМА КВПУ

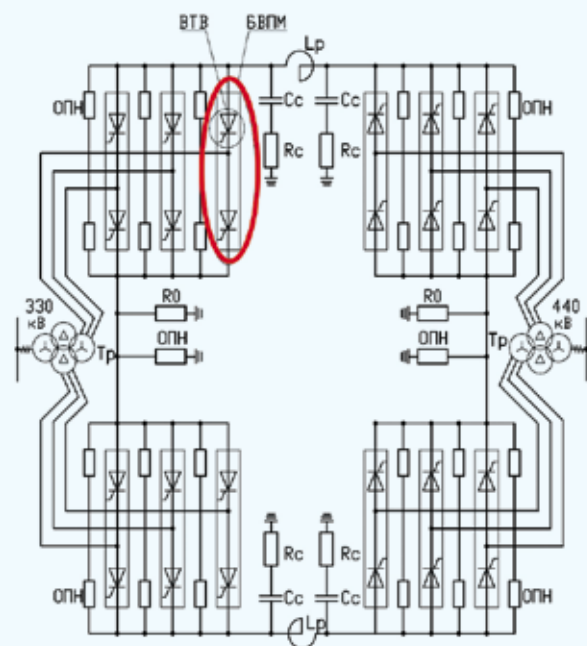


Рис. 2

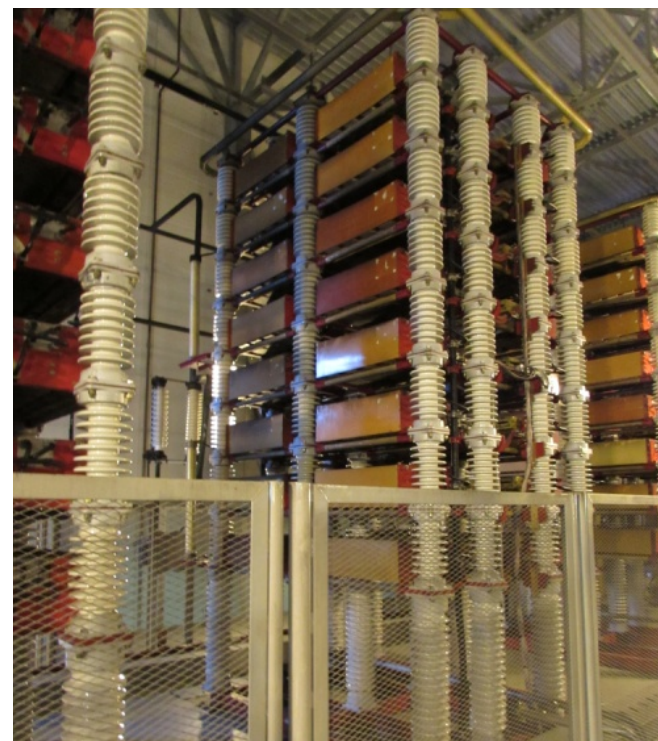


Рис.3.
БВПМ старой конструкции на КВПУ

тока на ПС 400 кВ «Выборгская». В 2017 г. ПАО «ФСК ЕЭС» в рамках НИОКР поручило АО «НТЦ ФСК ЕЭС» выполнить разработку вентильного оборудования на современной элементной базе, изготовить головной образец БВПМ и ввести его в опытно-промышленную эксплуатацию вместо одного из находящихся в эксплуатации.

Непременным условием выполнения работы являлись следующие требования:

- вновь разработанное оборудование должно иметь параметры, позволяющие ему временно работать совместно с вентилями старой конструкции, а также вписаться в присоединительные размеры на КВПУ;

- при разработке необходимо везде, где возможно, использовать материалы и комплектующие российского производства.

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО НОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В течение 2017–2018 гг. в АО «НТЦ ФСК ЕЭС» была разработана документация и изготовлены БВПМ–М (М — модернизированный), система охлаждения (СО) и шкаф управления (ШУ) для него, проведены испытания на специализированных стендах [4].

В процессе разработки были приняты во внимание недостатки старой конструкции КВПУ и пожелания заказчика в части облегчения эксплуатации вентильного оборудования.

Внешний вид БВПМ–М изображен на рис. 4. ВТВ БВПМ–М состоит из четырех высоковольтных тиристорных модулей, соединенных последовательно. ВТМ располага-

ются на этажах рамной конструкции БВПМ по одному на этаж, представляют собой устройства, состоящие из последовательно соединенных двух дросселей насыщения и тиристорной сборки (рис. на стр. 70).

Тиристорная сборка состоит из последовательно соединенных 12 тиристорov типа T283–1600–60 и 13 охладителей с единым прижимным устройством, блока конденсаторов, резисторов цепей деления напряжения между тиристорными ячейками (ТЯ), стойки с блоками управления, двух коллекторов с трубками для подвода (отвода) охлаждающей жидкости к охладителям и дросселям насыщения. Питание блоков управления производится путем отбора мощности с тиристорной ячейки. Управление и контроль тиристорных ячеек ВТВ БВПМ–М осуществляется по дублированным оптическим линиям связи. В процессе работы блоки управления ВТМ непрерывно



Рис.4.
Конструкция БВПМ–М

производят измерение оптической мощности управляющих сигналов и температуры охладителя ТЯ с передачей диагностической информации в ШУ.

В качестве тиристорного ключа применяется прибор T283–1600 60-го класса (ПАО «Электровыпрямитель», г. Саранск) [5]. На БВПМ старой конструкции использовались ключи 42-го класса. Переход на тиристоры с более высоким классом напряжения позволил снизить количество тиристорных ячеек в вентиле с 64 до 48. Это в совокупности с применением современных конструктивных материалов и новых компоновочных решений позволило уменьшить занимаемую площадь и вес БВПМ примерно вдвое.

ВТМ подключается к магистральным коллекторам охлаждающей жидкости БВПМ–М через запорные быстроразъемные соединения, что позволяет производить замену модуля без слива охлаждающей жидкости.

Система охлаждения БВПМ (рис. 5) двухконтурная. В качестве теплоносителя первого контура, омывающего охладители тиристорных ячеек БВПМ, применяется деионизированная вода. Теплоноситель второго контура — раствор полипропиленгликоля. Система охлаждения БВПМ состоит из ШУ, СО, насосов деионизированной воды, теплообменника, системы деионизации, насосов антифриза и сухой градирни, а также набора контрольно-измерительной аппаратуры для управления системой и работой аварийных защит. Насосы СО оснащены частотным приводом. Разработанная система охлаждения отличается от находящейся в эксплуатации системы существенно большей энергоэффективностью [6].

ШУ БВПМ–М представляет собой программно-аппаратный комплекс,

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ БВПМ: А) НАСОСНАЯ СТАНЦИЯ; Б) СУХАЯ ГРАДИРНЯ



Рис. 5

а)

б)

предназначенный для управления, защиты и сигнализации ВТВ, составляющих блок вентиля преобразовательного моста КВПУ. ШУ осуществляет следующие функции:

- прием сигналов интервалов проводимости от системы управления КВПУ и формирование импульсов управления на тиристорные ячейки ВТВ блока вентиля;

- контроль исправности оборудования тиристорных ячеек вентиля БВПМ;

- контроль исправности собственного оборудования шкафа управления;

- передача диагностической информации в АСУ ТП.

ШУ выполнен на основе архитектуры п-ТСА. Данная архитектура разработана АО «НТЦ ФСК ЕЭС» и представляет собой реализованную в форм-факторе «Евромеханика», оптимизированную для задач управления высоковольтными

преобразовательными устройствами архитектуру Micro-TCA (Micro Telecommunications Computing Architecture — современная архитектура построения вычислительных и телекоммуникационных систем). В ШУ БВПМ-М реализовано резервирование всех функциональных модулей с возможностью горячей замены неисправных. На всех уровнях иерархии ШУ применяется архитектура двойной звезды, кроме того, он обладает возможностью детальной диагностики состояния собственного оборудования.

ИСПЫТАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ БВПМ-М

Оборудование БВПМ-М, ШУ и СО подвергалось заводским и типовым испытаниям в соответствии с требованиями действующих в России отраслевых стандартов, стандартов организации ПАО «ФСК ЕЭС», с учетом требований между-

народных стандартов IEC 60700-1, IEC 60060, IEC 61803 и IEC 600071-1, относящихся к тематике испытаний вентиляционного оборудования вставок и передач постоянного тока [7].

Оборудование БВПМ подвергалось длительным испытаниям в режимах, соответствующих максимальным токовым и потенциальным воздействиям на тиристоры ВТВ, в режимах с максимальной выделяемой мощностью в элементах цепей деления напряжения. Проверялась работа ВТВ в условиях минимального напряжения переменного тока, режимах работы КВПУ с прерывистым током, аварийных режимах КВПУ, устойчивость оборудования БВПМ к воздействию грозовых и коммутационных импульсов, электромагнитная совместимость систем управления элементов БВПМ.

Испытания проводились на стендах АО «НТЦ ФСК ЕЭС» в г. Москве и подтвердили соответствие характеристик изготовленного оборудования расчетным [8, 9].

ПУСКОНАЛАДОЧНЫЕ РАБОТЫ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ БВПМ-М НА ПС 400 КВ «ВЫБОРГСКАЯ»

В мае 2019 г. оборудование БВПМ-М было смонтировано на ПС 400 кВ «Выборгская» в составе инверторного преобразователя КВПУ-3 (рис. 6). После проведения индивидуальных испытаний оборудования БВПМ-М, СО и ШУ было проведено комплексное опробование БВПМ в составе КВПУ.

Комплексное опробование включало в себя следующие виды проверок и испытаний:

- длительная работа КВПУ-3 в режимах с минимальным и максимальным выпрямленным током;

- имитация отказа системы охлаждения БВПМ-М. Опыт проводился путем ручного отключения вентиляторов контура антифриза;

- имитация нарушения коммутации на БВПМ-М. Опыт проводился путем искусственного кратковременного блокирования импульсов управления ВТВ от системы управления;

- опыт горячей замены функциональных модулей ШУ без отключения импульсов управления с КВПУ;

- имитация отказа ТЯ вплоть до полной потери избыточности путем последовательного отсоединения управляющих и контрольных световодов на ШУ;

– 72 ч работы КВПУ-3 в режиме регулирования передаваемой мощности от центрального регулятора ВПК.

Пусконаладочные работы БВПМ-М были успешно завершены в июне 2019 г. Выявленные незначительные недостатки, не влияющие на работу БВПМ-М, были оперативно устранены. После окончания пусконаладочных работ оборудование БВПМ-М

было передано в опытно-промышленную эксплуатацию сроком 5 месяцев.

За время опытно-промышленной эксплуатации на БВПМ-М не произошло ни одного аварийного случая, ни один тиристор не вышел из строя, что говорит о правильности принятых технических решений. Были подтверждены расчетные показатели надежности оборудования БВПМ-М [10].



Рис. 6.
БВПМ-М в вентиляльном зале КВПУ-3

По результатам опытно-промышленной эксплуатации в ноябре 2019 г. было рекомендовано приступить к тиражированию БВПМ-М для замены других БВПМ в составе КВПУ-3.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЫБОРГСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Начиная с 2014 г. фиксируется ежегодный рост экспорта электроэнергии из России на европейские рынки электроэнергии. Объем экспорта электроэнергии через ВПК в Финляндию за 2019 г. составил 6,5 ТВт·ч (рис. 7) [11] при годовой средне-взвешенной разнице оптовых цен на электроэнергию в РФ и Финляндии ~31 евро/МВт·ч [12].

Политическими лидерами прибалтийских стран озвучены планы до 2025 г. осуществить выход из Энергетиче-

ского кольца БРЭЛЛ, объединяющего энергосистемы Белоруссии, России, Эстонии, Литвы и Латвии. В настоящее время по БРЭЛЛ в страны Балтии происходит экспорт российской электроэнергии в объеме ~4,5 ТВт·ч/год (рис. 8) [12]. В случае отключения прибалтийских стран от БРЭЛЛ ожидается компенсирующий скачкообразный рост транзита электроэнергии через ВПК.

Комплексная реновация оборудования КВПУ-3, строительство КВПУ-5 и КВПУ-6 взамен исчерпавших ресурс КВПУ-1 и КВПУ-2 позволят обеспечить экспорт электроэнергии в Финляндию в требуемом объеме с учетом вероятного роста.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа, посвященная созданию, изготовлению, испытанию и опытно-промышленной эксплуатации блока тиристорных вентилялей с автономной СО и ШУ, предназначенных для реконструкции

КВПУ, на ПС 400 кВ «Выборгская» успешно завершена.

Ежегодный рост экспорта электроэнергии в Финляндию указывает на необходимость скорейшей комплексной реновации устаревшего оборудования КВПУ-3 и строительства КВПУ-5 и КВПУ-6 взамен исчерпавших ресурс КВПУ-1 и КВПУ-2.

Поэтапная замена вентиляльного оборудования КВПУ на современное позволит сократить издержки на ремонт оборудования, повысит надежность работы Выборгского преобразовательного комплекса и энергоэффективность объекта.

Разработанное оборудование может быть использовано при новом строительстве вставок и передач постоянного тока аналогичного типа, в том числе при реализации проектов транспорта электроэнергии из России в Китай, Японию (создание Азиатского энергокольца), ЕС и другие страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазарев Н. С. Схема Выборгской выпрямительно-инверторной подстанции, условия работы комплектных преобразовательных устройств/Электротехническое оборудование для вставки постоянного тока. ВЗИ. Сб. науч. тр. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 7–10.
2. Gusakovskiy K. B., Lozinova N. G., Suslova O. V., Zmaznov E. U. Operating experience and ways to improve reliability of Vyborg back-to-back HVDC link (in connection with the 35th anniversary of the commissioning of the first converter unit). CIGRE B4–136, 2018, PARIS.
3. Таратута И. П., Резов Ю. М. Высоковольтный вентиляльный блок/Электротехническое оборудование для вставки постоянного тока. ВЗИ. Сб. науч. тр. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 18–26.
4. Пешков М. В. Разработка блока тиристорных вентилялей на современной отечественной элементной базе с автономной системой охлаждения для ПС 400 кВ Выборгская/Опыт и перспективы применения силовой электроники и электропередач постоянным током для повышения надежности электрических сетей и реализации междуна-

ЭКСПОРТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЕВРОПЕЙСКИЕ РЫНКИ И ЦЕНОВОЙ СПРЕД ЗА 2018–2019 ГГ.

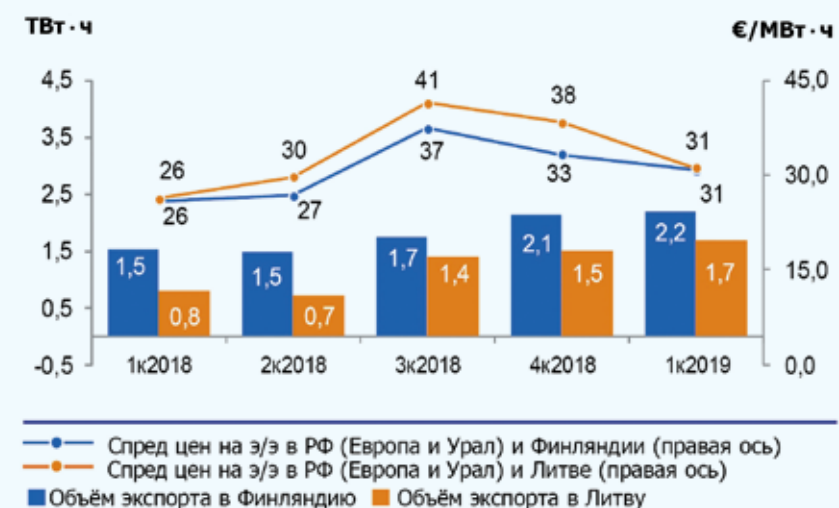


Рис. 8
Источник: данные ПАО «Интер РАО».

родных проектов (РНК СИГРЭ В4): тезисы докл. Всероссийской конф. М., 2017.

5. Самойлов А., Сергунина Т., Халугин А., Мартыненко В., Гришанин А. Мощные тиристоры для преобразователей линий электропередачи постоянного тока//Силовая электроника. 2019. № 5. С. 5–10.
6. Ройзен Л. И., Ровинский А. Е., Демчина А. А., Ветроградская Л. М., Рубин И. Р. Система водяного охлаждения комплектного высоковольтного преобразовательного устройства/Электротехническое оборудование для вставки постоянного тока. ВЗИ. Сб. науч. тр. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 59–66.
7. Пешков М. В., Карпов В. Н., Матинян А. М. Опыт разработки и испытаний вентиляльного оборудования для поэтапной реконструкции КВПУ на ПС 400 кВ Выборгская/ТРАВЭК XXVIII: тезисы докл. Всероссийской конф. М., 2018.
8. Алексеев Н. А., Булыкин П. Ю., Змазнов Е. Ю., Карпов В. Н., Ложинова Н. Г., Матинян А. М., Пешков М. В., Сафонов Е. П., Сулова О. В. Модернизация Выборгского преобразовательного комплекса. Расчет стойкости вентиляльного оборудования воздействию грозового импульсного напряжения//Электрические станции. 2018. № 11. С. 41–48.
9. Peshkov M. V., Alekseev N. A., Bulykin P.Yu., Zmaznov E.Yu., Karpov V. N., Lozinova N. G., Matinyan A. M., Safonov E. P., Suslova O. V., Upgrading of the Vyborg converter substation: analysis of lightning impulse voltage withstand capability//Power Technology and Engineering. Vol. 53. No. 1. May, 2019. P. 106–112.
10. Алексеев Н. А., Булыкин П. Ю., Змазнов Е. Ю., Карпов В. Н., Ложинова Н. Г., Матинян А. М., Пешков М. В., Сулова О. В. Модернизация ПС Выборгская. Оценка надежности нового высоковольтного вентиляльного оборудования//Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2018. № 1 (78).
11. Официальный сайт Fingrid — Finland's transmission system operator. История транзита электроэнергии из России в Финляндию. URL: <https://www.fingrid.fi/en/electricity-market/cross-border-transmission/information-about-russian-electricity-markets/history-data-from-russia/> (дата обращения 01.12.2019).
12. Официальный сайт Группы «Интер РАО» — монополющего российского оператора экспорта-импорта электроэнергии. Консолидированные финансовые и производственные результаты деятельности Группы «Интер РАО». URL: https://www.interra.ru/upload/iblock/94c/IFRS_1Q2019_ru.pdf (дата обращения 01.12.2019).

ИНФОРМАЦИЯ

Наличие между Россией и Финляндией трансграничных электрических связей обеспечивает ежедневное взаимодействие АО «СО ЭЭС» с системным оператором Финляндии Fingrid Oyj на основе ряда совместных документов:

– Межсистемного договора;

– Соглашения по эксплуатации трансграничных электрических связей;

– Соглашения по пропускной способности и осуществлению трансграничной торговли.

Техническая пропускная способность электропередачи составляет в нормальных условиях работы 1400 МВт из России в Финляндию и 350 МВт из Финляндии в Россию.

Из «Соглашения по эксплуатации трансграничных электрических связей 400 кВ между ПС Выборгская (Россия) и ПС Юликкяля / ПС Кюми (Финляндия)

«4.1. Под полной мощностью передачи понимается мощность, определяемая согласованным в соответствии с Соглашением по использованию пропускной способности и осуществлению трансграничной торговли по трансграничным электрическим связям 400 кВ ПС Выборгская (Россия) — ПС Юликкяля/ПС Кюми (Финляндия) графиком торговли с учетом возможности автоматического регулирования в пределах $\pm 10\%$ от графика передачи через параллельно работающие КВПУ.»

ТРАНЗИТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЧЕРЕЗ ВПК В ФИНЛЯндиЮ 2014–2019 ГГ.

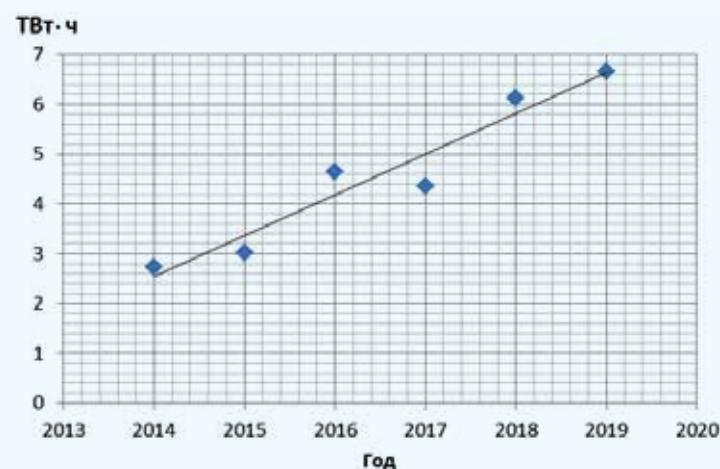


Рис. 7
Источник: данные Fingrid