

УДК 621.311

А. С. Брилинский, Г. А. Евдокунин, В. А. Крицкий, Ю. В. Матвиенков,  
Л. С. Смирнова, А. П. Сидельников

## **Фазопоротный трансформатор впервые применён на гидроэлектростанции**

Изложены результаты исследования эффективности применения и внедрения фазопоротного трансформатора на Волжской ГЭС. Показано, что ФПТ на Волжской ГЭС обеспечит на долгосрочную перспективу выдачу всей располагаемой мощности с учётом увеличения установленной мощности до 2744,5 МВт без дополнительного сетевого строительства.

*Ключевые слова:* фазопоротный трансформатор, схема выдачи мощности, гидроэлектростанция.

### **Введение**

Волжская ГЭС – крупнейшая гидроэлектростанция Волжско-Камского каскада и Европы, выдающееся энергетическое сооружение, великолепный образец инженерно-строительной и архитектурной творческой мысли была воздвигнута в рекордно короткие сроки. Первый грунт в котловане для будущей гидроэлектростанции был вынут в 1952 г. А в декабре 1958 г. уже был пущен первый гидроагрегат. Мировая практика сооружения электростанций не знала подобных объёмов и темпов работ. Волжская ГЭС – первая гидроэлектростанция в мире, где была разработана быстродействующая система возбуждения гидрогенераторов с применением управляемых преобразователей.

Её установленная мощность составляет 2671 МВт. Гидроэлектростанция является важным звеном Единой энергетической системы России и соединена с нею высоковольтными линиями электропередачи напряжением 220 и 500 кВ переменного тока. Волжская ГЭС предназначена для покрытия пиковой части графика нагрузки в ЕЭС России. Гидроузел основных сооружений Волжской ГЭС расположен в нижнем течении реки Волги, севернее г. Волгограда.

Проект Волжской гидроэлектростанции разработан Всесоюзным институтом «Гидропроект» им. С. Я. Жука с участием других проектных организаций. Водохранилище рассчитано на суточное регулирование с недельным циклом. В паводковый период гидроэлектростанция работает в базисе графика электрической нагрузки энергосистемы, а излишки воды сбрасываются через водосливную плотину.

На Волжской ГЭС установлены 23 гидроагрегата с поворотно-лопастными турбинами: 10 – мощностью по 125,5 МВт, 7 – мощностью по 115 МВт, 5 – мощностью по 120 МВт, 1 – мощностью 11 МВт (агрегат рыбоподъёмника). Ранее на напряжении 800 кВ ( $\pm 400$  кВ) Волжская ГЭС была связана с Донбасской энергосистемой передачей постоянного тока (ВЛ 800 кВ ППТ Волгоград – Донбасс, выведена из эксплуатации в 2015 г.). Электрическая связь ОРУ 500 кВ и ОРУ 220 кВ осу-

ществляется через автотрансформатор связи 10Т типа 3×АОДЦТН-267000/500/220 мощностью 801 МВ·А.

В настоящее время оборудование на Волжской ГЭС обновляется в соответствии с Программой комплексной модернизации ПАО «РусГидро». На электростанции уже заменены 18 гидротурбин и 10 генераторов из 23. До конца 2018 г. на Волжской ГЭС также будут проведены работы по обновлению оборудования насосной потерны здания ГЭС, продолжится замена затворов водосливной плотины, решёток сороудерживающего сооружения, оборудования собственных нужд гидростанции. До 2025 года на Волжской ГЭС наряду с модернизацией гидроагрегатов будет построено КРУЭ-500 кВ вместо ОРУ-500 кВ и проведена замена ряда силовых трансформаторов [1].

### **Перспективы и проблемы развития электроэнергетики Волгоградской области**

По итогам комплексной модернизации, проводимой ПАО «РусГидро», на Волжской ГЭС будет выполнена замена гидроагрегатов мощностью 115 МВт на новые номинальной мощностью 125,5 МВт. Установленная мощность электростанции после перемаркировки ГА № 1, 2, 7, 10, 14, 15, 18 увеличится на 73,5 МВт до 2744,5 МВт к 2020 г.

Развитие электрических сетей 220 кВ и выше Волгоградской энергосистемы в период до 2024 года будет направлено на обеспечение технологического присоединения новых потребителей и повышение надёжности электроснабжения существующих потребителей Волгоградской области.

Значительное влияние на потокораспределение в электрической сети 220 кВ и выше в районе размещения Волжской ГЭС, в том числе по ВЛ, входящим в СВМ электростанции (см. рис. 1), оказало снижение с октября 2013 г. более чем на 95 % потребления «Волгоградского алюминиевого завода» (внешнее электроснабжение «Волгоградского алюминиевого завода» осуществляется от ПС 220 кВ Алюминиевая) и исключение с 2015 г. экспорта электроэнергии с шин Волжской ГЭС на Украину, обусловленное выводом из эксплуатации межгосударственной линии электропередачи постоянного тока ВЛ 800 кВ Волгоград – Донбасс.

Передача постоянного тока Волгоград – Донбасс строилась и вводилась в эксплуатацию отдельными этапами с постепенным увеличением напряжения и мощности преобразовательных подстанций. В октябре 1962 г. она была включена при напряжении 100 кВ по униполярной схеме с параллельным соединением обоих полюсов воздушной линии и возвратом тока через землю. Последний этап строительно-монтажных и наладочных работ был завершён в апреле 1965 г., впервые в мировой практике, была осуществлена передача энергии постоянным током при напряжении 800 кВ (мощность передачи – 720 МВт, с 1988 год – ±200 кВ/360 МВт). Передача постоянного тока использовалась как мощная межсистемная связь в составе Единой энергетической системы европейской части СССР [2].

В результате воздействия указанных факторов Волжская ГЭС столкнулась с одной из наиболее насущных проблем современных энергосистем – ограничением пропускной способности прилегающей электрической сети в связи с высокой загрузкой линий электропередачи более низкого напряжения (110–220 кВ), в то время

как линии электропередачи более высокого класса напряжения (500 кВ) остаются недогруженными. Из-за ограничений пропускной способности электрической сети 220 кВ в районе размещения гидроэлектростанции в послеаварийных режимах возникает опасность выхода параметров электроэнергетического режима из области допустимых значений и соответствующая необходимость ограничения выдачи мощности станции. С учётом запланированного увеличения установленной мощности Волжской ГЭС ситуация в энергорайоне только усугубится.

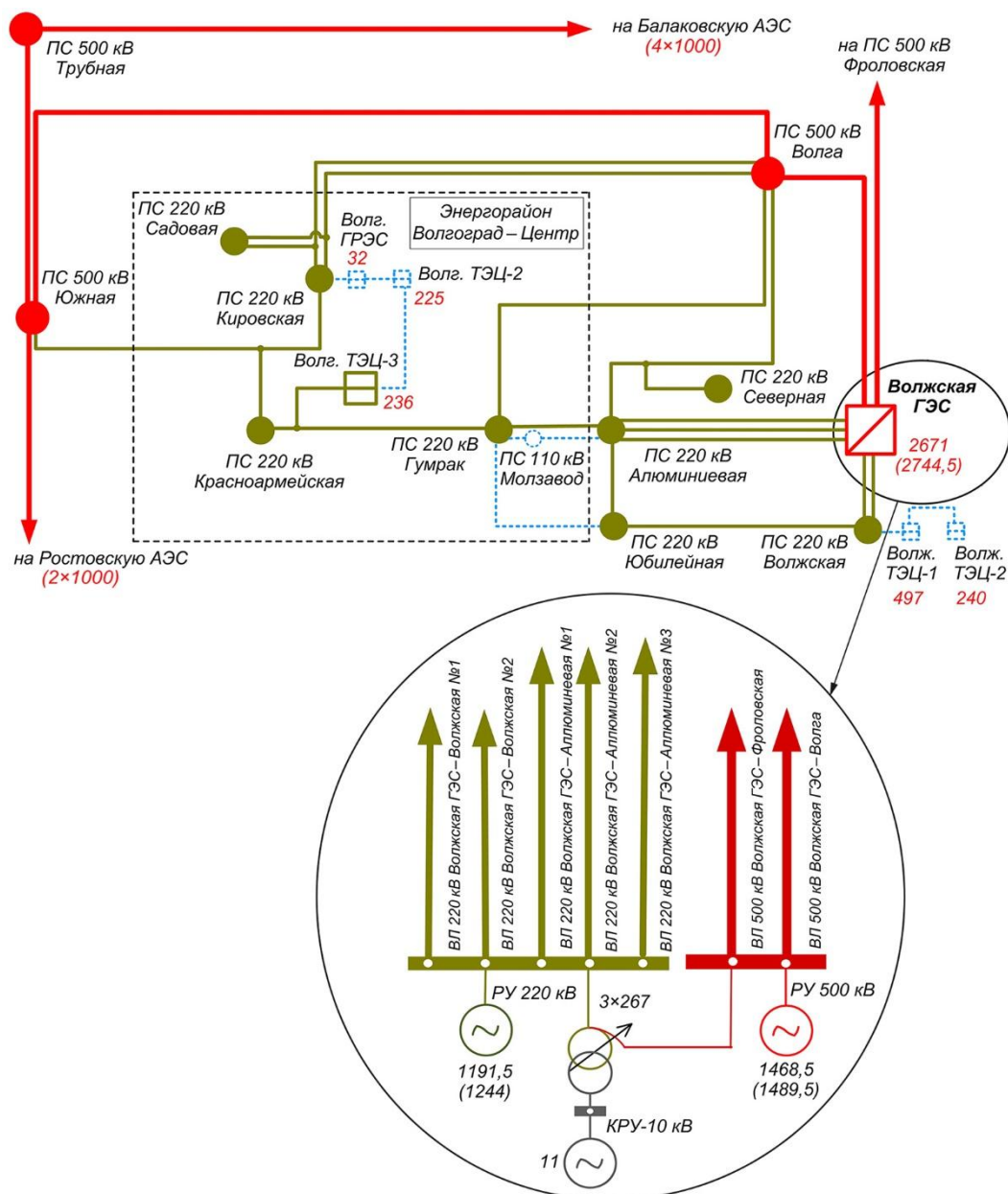


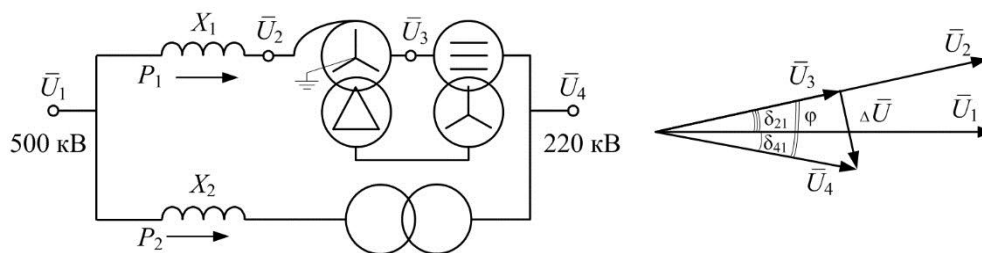
Рис. 1. Структурная схема электрической сети Волгоградской ЭС в зоне размещения Волжской ГЭС

Традиционный вариант решения – мероприятия по усилению прилегающей электрической сети 220 кВ. Однако в связи со значительными технологическими и правовыми сложностями в части землеотвода для объектов электросетевого хозяйства на прилегающих территориях Волгоградской области и высокой стоимости реализации данный вариант принят нецелесообразным.

### Фазоповоротный комплекс и особенности его конструкции

Для исключения (снижения) ограничений выдачи мощности на Волжской ГЭС в нормальном и послеаварийном режимах нормальной и ремонтных схем ПАО «РусГидро» была предложена установка фазоповоротного трансформатора (ФПТ) – инновационное решение для российской электроэнергетики. Такое решение позволит увеличить пропускную способность электрической сети за счёт перераспределения потоков активной мощности между ОРУ 500 и 220 кВ Волжской ГЭС, а также обеспечить выдачу всей располагаемой мощности станции и возможность гибкого регулирования загрузки ВЛ 500 и 220 кВ, отходящих от Волжской ГЭС.

Поясним основные принципы регулирования перетока активной мощности с помощью фазоповоротного трансформатора на Волжской ГЭС. Для этого рассмотрим схему на [рис. 2](#), где показаны две параллельные ветви сети одного класса напряжения с индуктивными сопротивлениями  $X_1$  и  $X_2$ .



**Рис. 2.** Схема замещения участка сети и векторная диаграмма напряжений

При передаче активных мощностей  $P_1$  и  $P_2$  без ФПТ в направлении, указанном на рисунке, вектор напряжения  $\bar{U}_1$  опережает векторы  $\bar{U}_2$  и  $\bar{U}_4$ , так как активная мощность передаётся от опережающего вектора к отстающему [3].

Для изменения направления и увеличения мощности  $P_1$ , передаваемой через автотрансформатор 10Т в сторону РУ 220 кВ Волжской ГЭС, и уменьшения мощности, передаваемой от шин РУ 220 кВ Волжской ГЭС в примыкающую сеть 220 кВ, необходимо обеспечить опережение вектором  $\bar{U}_2$  вектора отправной системы  $\bar{U}_1$ . Это можно сделать, введя угол  $\phi$  с помощью ФПТ, так чтобы  $|\phi| > |\delta_{41}|$ . При некотором заданном угле  $\phi$  активные мощности будут равны:

$$P_1 = \frac{U_1 U_2}{x_1} \sin \delta_{21} = \frac{U_1 U_2}{x_1} \sin(\delta_{41} - \phi), \quad P_2 = \frac{U_1 U_4}{x_2} \sin \delta_{41}.$$

Фазоповоротный комплекс Волжской ГЭС состоит из двух частей: группы существующих однофазных автотрансформаторов связи (3×АОДЦТН-267000/500/220) и вновь вводимого вольтодобавочного трансформатора ТДЦТНФ-195260/220-У1 производства ООО «Силовые машины – Тошиба. Высоковольтные трансформаторы». Трёхфазная схема фазоповоротного комплекса представлена на [рис. 3](#).

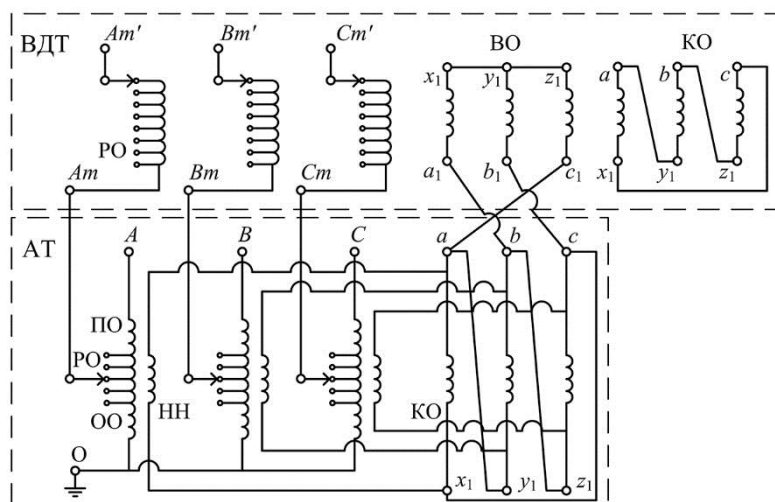


Рис. 3. Трёхфазная схема фазоповоротного комплекса

Устройство РПН, установленное на ВДТ, предназначено для поперечного регулирования напряжения, которое изменяет величину потока мощности через АТ с ФПТ. Число ступеней регулирования ВДТ составляет 14 (у АТ – 17 ступеней), при этом диапазон регулирования угла изменяется в пределах от 4 до 13,57 электрических градусов при номинальном напряжении СН автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 в режиме холостого хода [4].

### Эффективность применения фазоповоротного трансформатора

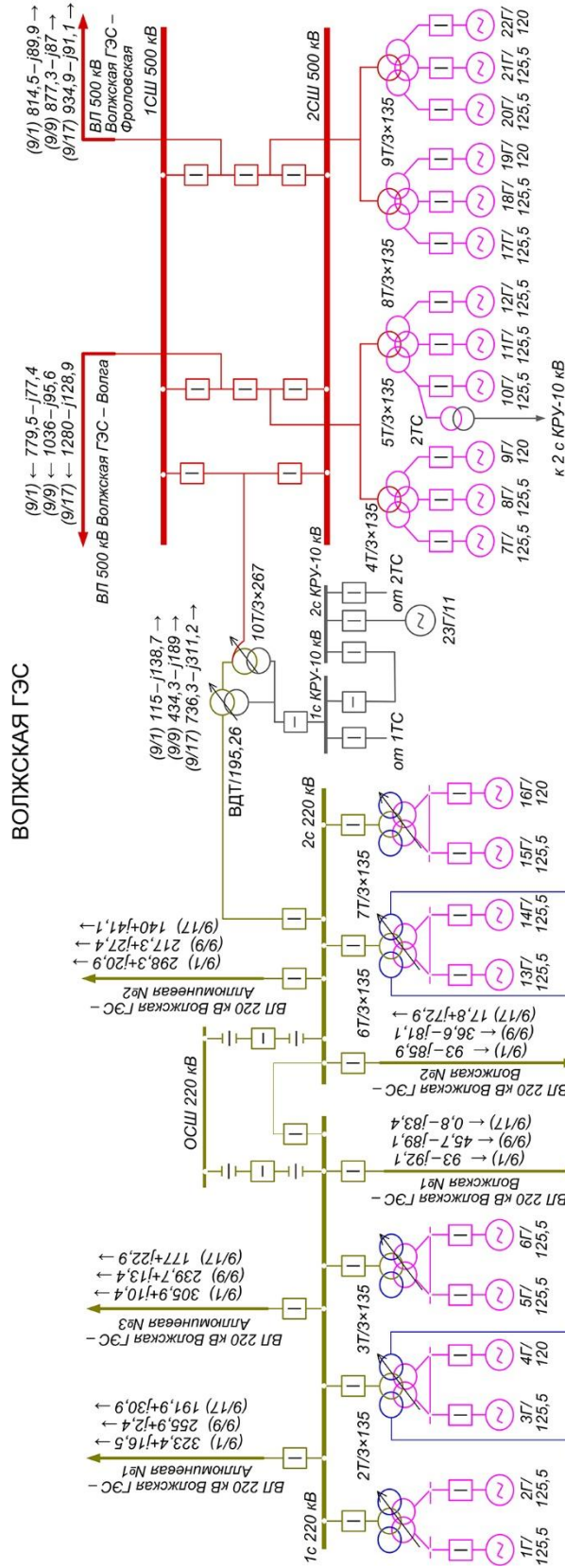
Авторами в рамках работы «Уточнение схемы выдачи мощности Волжской ГЭС с увеличением мощности гидроагрегатов ст. № 2, 1, 15, 7, 10, 14, 18» для анализа возможности и эффективности применения ФПТ исследовались 2 варианта: без ФПТ и с установкой ФПТ на электростанции.

Результаты расчетов подтвердили техническую возможность перераспределения потоков активной мощности между электрической сетью 220 кВ и 500 кВ Волгоградского энергоузла.

При отсутствии ФПТ в ряде послеаварийных режимов нормальной схемы не обеспечивается выдача располагаемой мощности Волжской ГЭС из-за превышения величины аварийно допустимой токовой загрузки элементов сети 110 кВ и выше в прилегающей к электростанции электрической сети. Требуемое ограничение выдачи мощности Волжской ГЭС достигает 700 МВт (~25 % от установленной мощности) в зависимости от сезона и режима нагрузок энергосистемы.

Зависимость загрузки активной мощностью ВЛ 220 и 500 кВ, отходящих от шин Волжской ГЭС, от положения отпаяк РПН автотрансформатора и вольтодобавочного трансформатора в нормальной схеме в режиме паводка при загрузке Волжской ГЭС на располагаемую мощность представлена на **рис. 4**. Из рисунка видно, что регулирование отпаяк ВДТ позволяет повысить передаваемую мощность по ВЛ 500 кВ Волжская ГЭС – Волга и ВЛ 500 кВ Волжская ГЭС – Фроловская, а также снизить потоки мощности по пяти отходящим ВЛ 220 кВ от шин Волжской ГЭС (**рис. 5**).

Оба трансформатора имеют устройства РПН, которые позволяют регулировать коэффициент трансформации по виткам. Устройство РПН, установленное на стороне среднего напряжения АТ, предназначено для продольного регулирования напряжения на зажимах АТ в пределах  $\pm 8 \times 1,5 \%$ .



**Рис. 4.** Потокораспределение по ВЛ 220 и 500 кВ, отходящим от шин Волжской ГЭС, в режиме паводка с учётом регулирования ФПТ при нагрузке Волжской ГЭС на располагаемую мощность

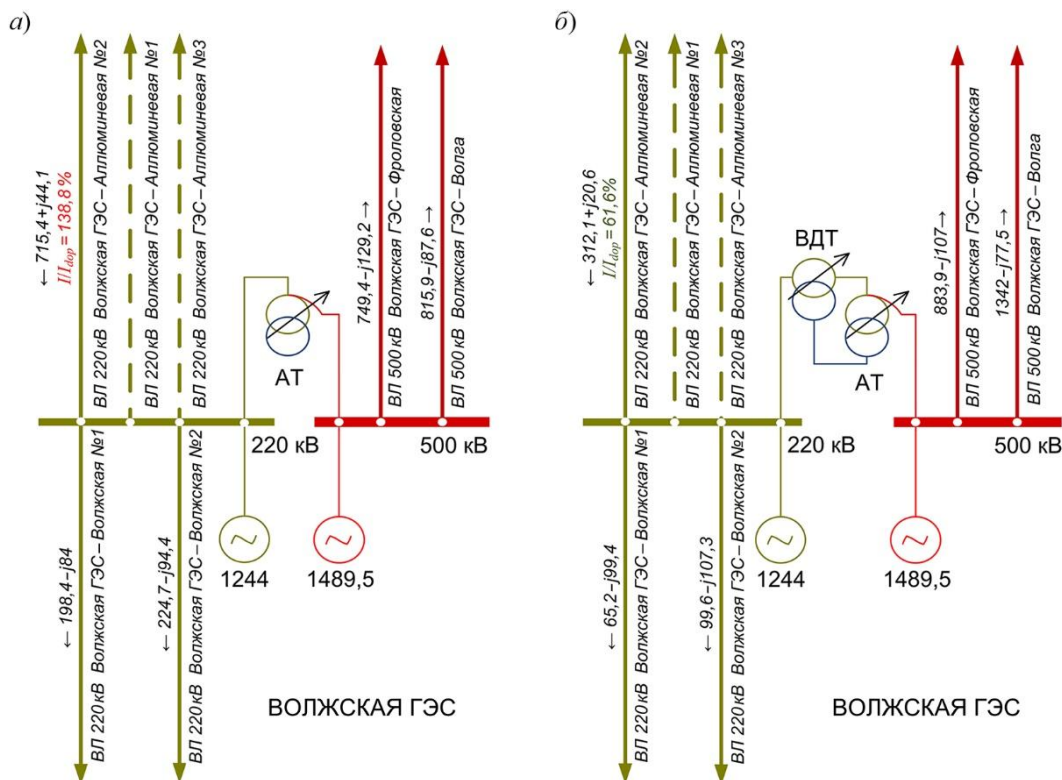


Рис. 5. Потокораспределение в примыкающей к Волжской ГЭС сети: а) без учёта установки ФПТ, б) с учётом установки ФПТ

Проведенные расчеты позволили определить оптимальное для Волжской ГЭС сочетание отпаяк РПН АТ и ВДТ для различных сезонов, практически полностью исключающее ограничения на выдачу мощности станцией (табл. 2).

Таблица 2

Величина ограничений мощности Волжской ГЭС в нормальной схеме (в МВт)

Вариант СВМ	ОЗП <sup>1</sup> при ТНВ <sup>2</sup> +10°С	Лето min <sup>3</sup> при ТНВ +35°С	Лето max при ТНВ +35°С	Режим паводка при ТНВ +25°С
Отсутствие ФПТ	470	736	462	99
Наличие ФПТ	Без ограничений	39	Без ограничений	Без ограничений

<sup>1</sup> ОЗП – осенне-зимний период;

<sup>2</sup> ТНВ – температура наружного воздуха;

<sup>3</sup> Лето min/max – режим летних минимальных/максимальных нагрузок.

18 апреля 2019 года при участии АО «НТЦ ЕЭС» и АО «Институт Гидропроект» на Волжской ГЭС был запущен в эксплуатацию описанный выше фазоповоротный комплекс. При испытаниях за счёт перераспределения потоков активной мощности между ОРУ 500 кВ и 220 кВ Волжской ГЭС с помощью ФПК удалось осуществить передачу дополнительно 440 МВт активной мощности в сеть 500 кВ (рис. 6). Особенно важен тот факт, что установка ФПК позволит обеспечить полную выдачу мощности Волжской ГЭС в наступающий в регионе период паводка.

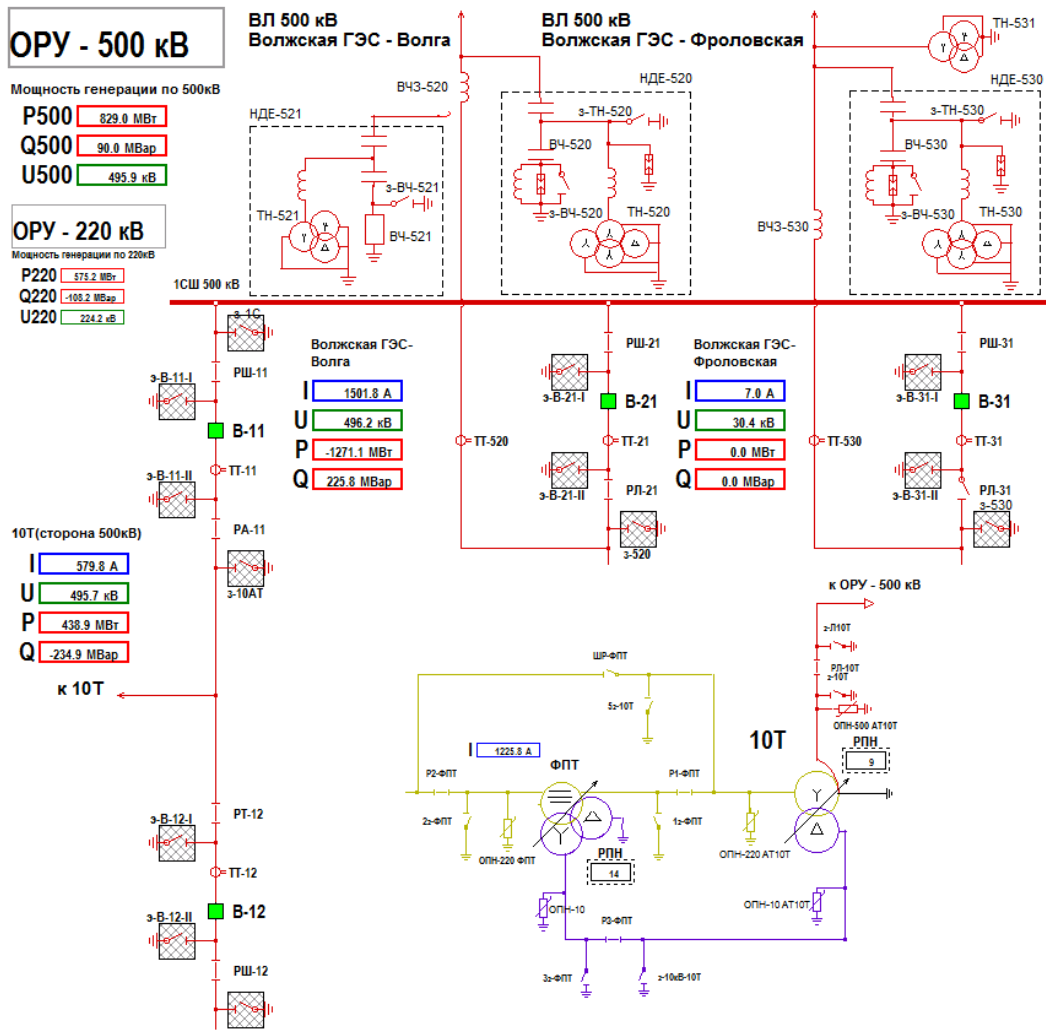


Рис. 6. Потокораспределение Волжской ГЭС на 18.04.2019  
(14-е положение РПН ВДТ 10Т)

Таким образом, установка ФПТ позволит обеспечить полную выдачу мощности Волжской ГЭС в осенне-зимний период, период паводка и в режиме летних максимальных нагрузок рабочего дня. В режиме летних минимальных нагрузок выходного дня потребуется незначительное (менее 1,5% от установленной мощности) ограничение мощности Волжской ГЭС только при температуре наружного воздуха более +25°C.

Установка ФПТ на Волжской ГЭС, по оценкам авторов, потребовала финансирования в размере 531 млн руб. (с учетом НДС, в ценах на уровне 4 кв. 2016 г.), что более чем в 2,5 раза меньше, чем в случае строительства ЛЭП 220 кВ, стоимость которого составила бы 1 291 млн руб. (с учетом НДС, в ценах на уровне 4 кв. 2016 г.).

Полученные результаты доказывают эффективность применения ФПТ на Волжской ГЭС для обеспечения выдачи всей располагаемой мощности с учётом перспективного развития электростанции.



## Заключение

Применение ФПТ на Волжской ГЭС с учётом реализации запланированного Программой комплексной модернизации ПАО «РусГидро» увеличения установленной мощности до 2744,5 МВт к 2020 году позволит осуществлять сезонное и плановое регулирование потоков активной мощности между РУ 220 и 500 кВ Волжской ГЭС, гарантировав надёжное и эффективное управление электростанцией без дополнительного сетевого строительства.

## Список литературы

1. Официальный интернет-сайт ПАО «Федеральная гидрогенерирующая компания-РусГидро» – «Волжская ГЭС» <http://www.volges.rushydro.ru/>.
2. *Поссе А. В.* Схемы и режимы электропередач постоянного тока. – Ленинград: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1973. – 303 с.: ил.
4. *Евдокунин Г. А.* Электрические системы и сети: учеб. пособие. – 4-е изд., испр. и доп. – СПб: Родная Ладога, 2016. – 384 с.
5. *Брилинский А. С., Крицкий В. А., Смирнова Л. С.* Особенности применения фазоповоротных комплексов в электроэнергетических системах // Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2018, № 1 (78). – С. 6–10.

*Брилинский Андрей Станиславович*, канд. техн. наук, заведующий отделом проектирования и развития энергосистем Научно-технического центра Единой энергетической системы (АО «НТЦ ЕЭС»).

E-mail: [brilinskiy@ntcees.ru](mailto:brilinskiy@ntcees.ru)

*Евдокунин Георгий Анатольевич*, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электрические системы и сети» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ).

E-mail: [evdg@etelecom.spb.ru](mailto:evdg@etelecom.spb.ru)

*Крицкий Виктор Анатольевич*, генеральный директор Научно-технического центра Единой энергетической системы (АО «НТЦ ЕЭС»).

E-mail: [ntc@ntcees.ru](mailto:ntc@ntcees.ru)

*Матвиенков Юрий Владимирович*, начальник отдела электроснабжения и связи Проектно-изыскательского и научно-исследовательского института «Гидропроект» им. С.Я. Жука (АО «Институт Гидропроект»).

E-mail: [yu.matvienkov@hydroproject.ru](mailto:yu.matvienkov@hydroproject.ru)

*Сидельников Андрей Павлович*, главный конструктор Силовые машины – Тошиба. Высоковольтные трансформаторы (ООО «СМТТ»).

E-mail: [info@pmtt.ru](mailto:info@pmtt.ru)

*Смирнова Любовь Сергеевна*, заместитель заведующего – заведующий лабораторией отдела проектирования и развития энергосистем Научно-технического центра Единой энергетической системы (АО «НТЦ ЕЭС»).

E-mail: [smirnova\\_1@ntcees.ru](mailto:smirnova_1@ntcees.ru)

