

УДК 621.311.001.895
Шифр специальности ВАК 2.4.2.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ ФАЗОПОВОРОТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ БЕЛОРУССКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

В настоящее время Белорусская энергосистема работает в режиме самобаланса в синхронной зоне только с ЕЭС России.

Питающая сеть 330–750 кВ Белорусской энергосистемы связана с ЕЭС России по воздушной линии (ВЛ) электропередачи напряжением 750 кВ («Смоленская АЭС — Белорусская») и трем ВЛ 330 кВ, нагрузка которых складывается исходя из режимов работы сетей разных классов напряжения обеих энергосистем.

Отсутствие управления потоками активной мощности (не считая возможности отключения элементов сети) ограничивает использование пропускной способности ключевых элементов питающей сети. Для решения описанной проблемы предлагается использовать фазоповоротные трансформаторы [1, 2, 3].

В статье приводятся результаты исследований эффективности применения асимметричных фазоповоротных трансформаторов (ФПТ) и ФПТ с симметричным регулированием угла (т. н. гексагональных ФПТ, [4]).

АВТОРЫ:
М.А. Кашин,
m.kashin@besp.by,
РУП «Белэнергосетьпроект»,
Минск, Республика Беларусь
А.Ю. Хренников, д. т. н.,
ORCID 0009-0005-4085-227X,
ak2390@inbox.ru,
АО «Россети Научно-технический
центр», Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
#энергосистема; #гексагональный
фазоповоротный трансформатор;
#потокораспределение активной
мощности

↓ ДЛ Я ЦИТИРОВАНИЯ:
Кашин М.А., Хренников А.Ю.
Возможности использования
гексагональных фазоповоротных
трансформаторов в питающей сети
Белорусской энергосистемы //
Энергия единой сети. 2026. № 1 (80).
С. 50–54.



Усть-Кут



ВВЕДЕНИЕ

В ранее опубликованных статьях описана техническая эффективность применения асимметричных ФПТ 330 кВ [2] и трансформаторов поперечного регулирования (ТПР) 150 кВ [1] в целях управления потокораспределением активной мощности в питающей сети 330–750 кВ Белорусской энергосистемы.

В настоящее время питающая сеть 330–750 кВ Белорусской энергосистемы работает в синхронной зоне только с ЕЭС России через воздушные линии (ВЛ) электропередачи напряжением 750 кВ («Смоленская АЭС — Белорусская») и три ВЛ 330 кВ от приграничных ПС 330 кВ (рис. 1):

- ВЛ 330 кВ «Кричев — Рославль»;
- ВЛ 330 кВ «Витебск — Талашкино»;
- ВЛ 330 кВ «Полоцк — Новосокольники».

Загрузка данных ВЛ 330–750 кВ складывается исходя из режимов работы сетей разных классов напряжения обеих энергосистем, что ограничивает использование пропускной способности ключевых элементов питающей сети.

Спецификой связи питающей сети Белорусской энергосистемы с ЕЭС России по сети 750 кВ является наличие цепочки из трех последовательных элементов: АТ 750 кВ мощностью 1000 МВА ПС 750 кВ «Белорусская» — ВЛ 750 кВ «Смоленская АЭС — Белорусская» — АТ 750/500 кВ мощностью 2х1250 МВА и АТ 500/330 кВ мощностью 2х500 МВА на Смоленской АЭС. Пропускную способность данной связи ограничивают АТ 750/500 кВ ПС 750 кВ «Белорусская» и АТ 500/330 кВ Смоленской АЭС.

В связи с вышеперечисленными факторами, для поддержания нормативного резерва мощности в размере мощности одного энергоблока Белорусской АЭС 1170 МВт в условиях ограниченности внешних связей по сети 330–750 кВ, возникает задача регулирования потоков активной мощности между сетями классов напряжения 330 кВ и 750 кВ (рис. 2).

Как известно, поток активной мощности по ЛЭП переменного тока определяется выражением (1).

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{\text{л}}} \cdot \sin \delta_{21}, \quad (1)$$

где U_1 и U_2 — модули напряжения на отправном и приемном концах ЛЭП;
 $X_{\text{л}}$ — индуктивное сопротивление линии;
 δ_{21} — угол сдвига фаз между векторами напряжений U_1 и U_2 .

В [1, 2] было показано, что для Белорусской энергосистемы, для регулирования потокораспределения активной мощности, наиболее эффективно использовать фазоповоротные устройства (ФПУ).

Необходимо отметить, что в настоящее время в ЕЭС России реализуются и планируются следующие технические решения [4]:

- в ОЭС Северо-Запада на Ленинградской АЭС автотрансформатор 750/330 кВ оснащен устройством поперечного регулирования напряжения — для регулирования перетоков активной мощности между сетями 330 кВ и 750 кВ;

- с 2019 г. на Волжской ГЭС успешно эксплуатируется ФПТ 220 кВ мощностью 195 МВА, который обеспечивает выдачу мощности станции;
- «Схемой и программой развития ЕЭС России на 2025–2030 гг. » предусмотрена реконструкция Воткинской ГЭС с установкой двух ФПТ 220 кВ по 501 МВА каждый, что позволит увеличить пропускную способность сечения «Урал — Запад».

В научной статье [2] были исследованы режимы работы сети 330 кВ и выше Белорусской энергосистемы при использовании ФПУ двух типов: однофазного регулировочного трансформатора поперечного регулирования (ТПР) типа ОДЦТНП-92000/150 напряжением 150 кВ, разработанного специально для работы с АТ 750/330 кВ, и асимметричного ФПТ напряжением 330 кВ, включаемого в рассечку ВЛ 330 кВ. Оба данных устройства обладают недостатками, не позволяющими получать значительные углы поворота векторов напряжения и изменять потоки активной мощности в значительном диапазоне. ТПР фактически является обмоткой АТ для создания поперечного вектора напряжения в цепи 330–750 кВ и позволяет получать углы холостого хода до 19 электрических градусов, а модуль напряжения в комплексе АТ + ТПР регулируется с использованием РПН АТ.

Асимметричный ФПТ 330 кВ при углах более 15–20 электрических градусов, в связи с отсутствием продольного регулирования напряжения, увеличивает модуль выходного напряжения до предельно допустимых величин. Эта особенность асимметричного ФПТ подробно описывается в [4].

В данной статье приводятся результаты расчетов потокораспределения в сети 330–750 кВ Белорусской энергосистемы с использованием ФПТ с симметричным регулированием угла (гексагонального ФПТ). Согласно [4], гексагональный ФПТ, благодаря наличию дополнительно-го РПН, может осуществлять продольное регулирование

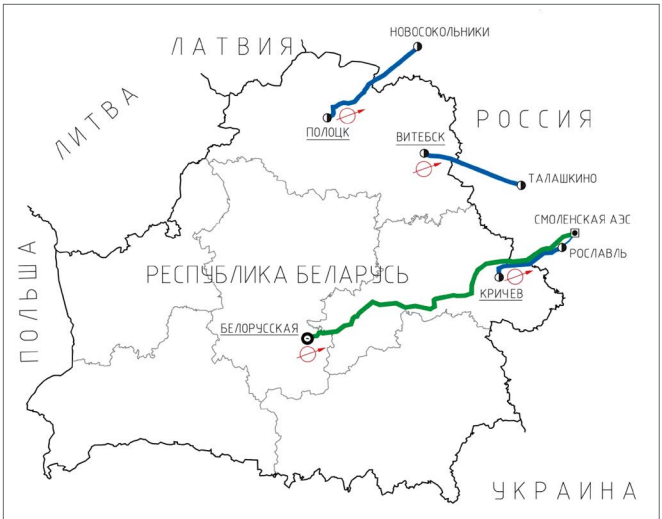


Рис. 1. Существующие ВЛ связи (330 кВ и 750 кВ) ОЭС Беларуси и ЕЭС России

напряжения, тем самым сохраняя модуль напряжения до и после ФПТ практически неизменным и обеспечивая допустимое напряжение во всем диапазоне регулирования угла [4].

Альтернативой ФПТ для регулирования потоков активной мощности могут служить передачи постоянного тока. Однако данный инструмент управления используется для связи энергосистем разных синхронных зон либо значительно удаленных друг от друга энергосистем одной синхронной зоны. Так, в РФ до 2036 г. предусмотрено сооружение ряда ЛЭП постоянного тока протяженностью от 550 до 1750 км и мощностью до 1000 МВт каждая. Аналогичную роль в устойчивом управлении потоком активной мощности могут играть вставки постоянного тока (ВПТ) [5]. Однако стоимость ВПТ превосходит стоимость ФПТ более чем в 15 раз.

РАСЧЕТЫ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ И УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

На рис. 3 изображены схема включения ФПТ и векторные диаграммы напряжений гексагонального и асимметричного ФПТ.

Для создания перетока мощности от точки 1 к точке 2 вектор напряжения $\bar{U}_1$ должен опережать вектор напряжения $\bar{U}_2$ на некоторый угол δ .

Определим коэффициенты трансформации асимметричного и гексагонального ФПТ в комплексной форме.

При использовании асимметричного ФПТ к вектору напряжения $\bar{U}_1$ прибавляется вектор напряжения $\Delta\bar{U}$, направленный под углом 90° (рис. 3 б), модуль данного вектора определяется по выражению:

$$|\Delta\bar{U}| = |\bar{U}_1| \cdot tg\delta. \tag{2}$$

Итоговое напряжение на выходе ФПТ можно записать суммой векторов в комплексной форме:

$$\bar{U}_2 = |\bar{U}_1| + j|\Delta\bar{U}| = |\bar{U}_1| \cdot (1 + jtg\delta). \tag{3}$$

Коэффициент трансформации асимметричного ФПТ в комплексной форме будет иметь вид:

$$K_{т(АФПТ)} = \frac{\bar{U}_2}{\bar{U}_1} = \frac{|\bar{U}_1| \cdot (1 + jtg\delta)}{|\bar{U}_1|} = 1 + jtg\delta. \tag{4}$$

При использовании гексагонального ФПТ к вектору напряжения $\bar{U}_1$ прибавляется вектор напряжения $\Delta\bar{U}$, направленный под углом $\delta' = 90 - \delta/2$ (рис. 3в), модуль данного вектора определяется по выражению:

$$|\Delta\bar{U}| = 2 \cdot |\bar{U}_1| \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right). \tag{5}$$

Итоговое напряжение на выходе гексагонального ФПТ (рис. 3в) можно записать суммой векторов в комплексной форме:

$$\bar{U}_2 = (|\bar{U}_1| - |\Delta\bar{U}''|) + j|\Delta\bar{U}'|, \tag{6}$$

где

$$|\Delta\bar{U}'| = |\Delta\bar{U}| \cdot \sin\delta'. \tag{7}$$
$$|\Delta\bar{U}''| = |\Delta\bar{U}| \cdot \cos\delta'. \tag{8}$$

Коэффициент трансформации гексагонального ФПТ в комплексной форме будет иметь вид:

$$K_{т(ГФПТ)} = \frac{\bar{U}_2}{\bar{U}_1} = \left(1 - 2 \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot \cos\left(90 - \frac{\delta}{2}\right)\right) + j2 \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot \sin\left(90 - \frac{\delta}{2}\right). \tag{9}$$

В таблице 1 приведены результаты расчета комплексных коэффициентов трансформации для асимметричных и гексагональных ФПТ по выражениям (4) и (9) соответственно.

Необходимо отметить следующее: уже при углах более 25 электрических градусов напряжение на выходе асимметричного ФПТ на 10 % превышает напряжение на входе, что может приводить, как будет показано электрическими расчетами ниже, к ограничениям использования асимметричных ФПТ по условию не превышения допустимых уровней напряжения в сети.

Использование асимметричного ФПТ последовательно с АТ и РПН (регулирующим продольную составляющую напряжения) позволяет компенсировать этот недостаток. Однако в некоторых режимах РПН АТ должен находиться в крайних положениях, что не всегда допустимо на практике по условиям работы данного устройства.

При расчетах режимов с использованием ФПТ 330 кВ обоих типов задавался диапазон значений комплексного коэффициента трансформации, соответствующий углам поворота напряжения на холостом ходу ± 35 электрических градусов. Сопротивление ФПТ определялось согласно

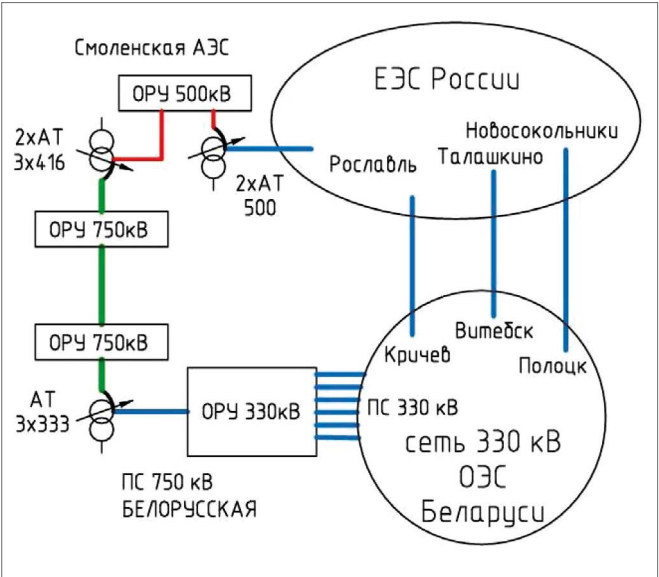


Рис. 2. Межсистемные связи Белорусской энергосистемы и ЕЭС России

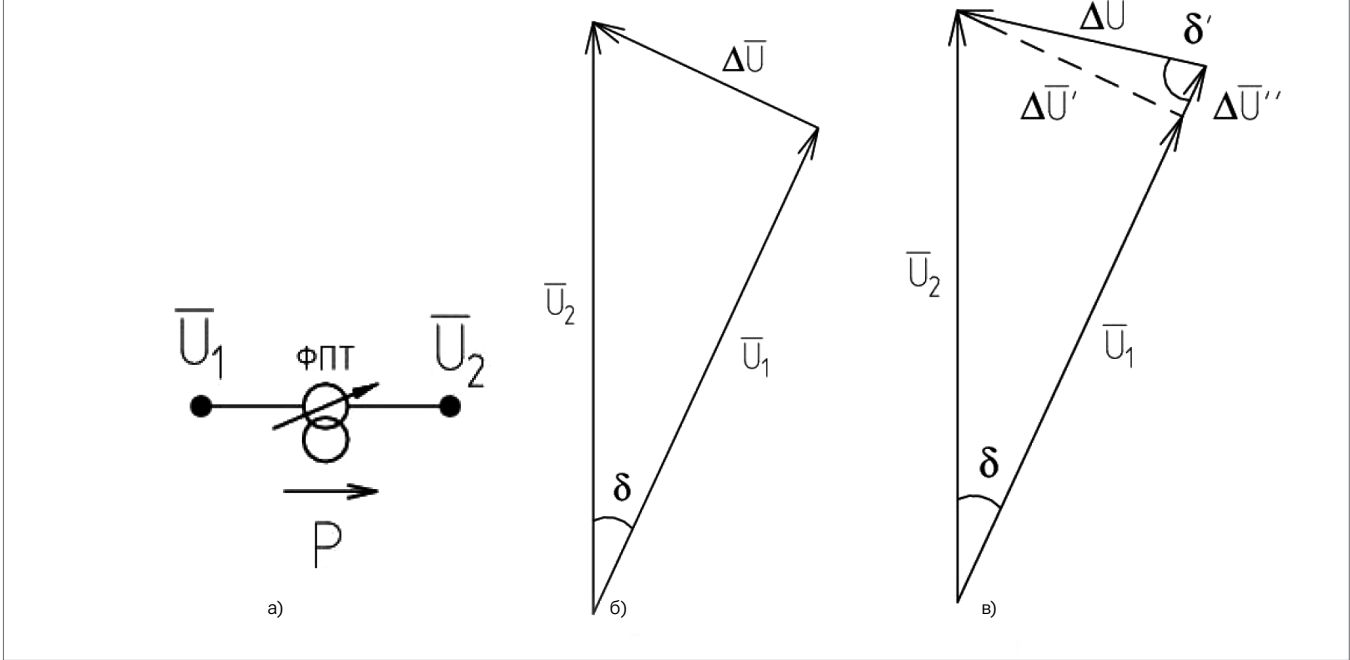


Рис. 3. Схема (а) и векторные диаграммы гексагонального (б) и асимметричного (в) ФПТ

Таблица 1. Результаты расчета комплексных коэффициентов трансформации для асимметричных и гексагональных ФПТ

Номер отпайки РПН ФПТ АТГ		0	7	12	17
δ, электрический градус		0	14	25	35
асимметричный ФПТ	Кт вещ.	1.00	1.00	1.00	1.00
	Кт мним.	0.00	0.26	0.50	0.70
	модуль напряжения, о.е.	1.00	1.03	1.10	1.22
гексагональный ФПТ	Кт вещ.	1.00	0.97	0.91	0.82
	Кт мним.	0.00	0.25	0.42	0.57
	модуль напряжения, о. е.	1.00	1.00	1.00	1.00

методике, изложенной в [4], в зависимости от угла поворота напряжения на холостом ходу.

Для оценки технической эффективности применения ФПУ описанных выше типов в программном комплексе RastrWin выполнена серия электрических расчетов потоков мощности, уровней напряжения в питающей сети 330–750 кВ Белорусской энергосистемы и прилегающей сети 330–750 кВ ЕЭС России с асимметричным и гексагональным ФПТ 330 кВ на ПС 750 кВ «Белорусская», установленным между выводами 330 кВ АТ2 750/330 кВ и ОРУ 330 кВ.

Элементами, ограничивающими пропускную способность сети 330 кВ и выше, являются АТ 750/330 кВ ПС «Белорусская» и АТ 500/330 кВ Смоленской АЭС.

В таблице 2 приведены диапазоны регулирования потока мощности по АТ 750/330 кВ ПС «Белорусская» и АТ 500/330 кВ Смоленской АЭС, а также — диапазоны расчетного угла поворота напряжения в нормальном режиме зимнего максимума.

Из таблицы 2 следует, что применение гексагонального ФПТ дает возможность регулировать поток мощности по ключевым элементам межсистемной связи Смоленск — Беларусь (АТ 750/330 кВ ПС «Белорусская» и АТ 500/330 кВ Смоленской АЭС) в большем диапазоне, чем при использовании асимметричного ФПТ 330 кВ. При этом диапазон регулирования загрузки АТ 750/330 кВ ПС «Белорусская» может составлять более 60 % номинальной мощности АТ в зависимости от исходного режима сети.

Таблица 2. Диапазоны изменения потока мощности по АТ 750/330 кВ ПС «Белорусская» и АТ 500/330 кВ Смоленской АЭС, диапазоны расчетного угла поворота напряжения в нормальном режиме зимнего максимума

№ п/п	Тип и место установки ФПУ		Диапазон изменения загрузки, МВт		Диапазон расчетного угла поворота напряжения, электрический градус
			АТ 750/330 кВ 1000 МВА ПС «Белорусская»	АТ 500/330 кВ 2х500 МВА Смоленской АЭС	
1	Асимметричный ФПТ 330 кВ на ПС 750 кВ «Белорусская»	Нормальный режим	1042	732	-21.8 ... + 24.8
2		Отключение блока 1200 МВт Белорусской АЭС	838	622	-20 ... + 18.4
3		Отключение двух блоков 1200 МВт Белорусской АЭС	86	130	-4.4 ... 0
4		Отключение АТ11 Смоленской АЭС и блока 1200 МВт Белорусской АЭС	363	492	0 ... + 17.2
5	Гексагональный ФПТ 330 кВ на ПС 750 кВ «Белорусская»	Нормальный режим	1266	890	-28.3 ... + 28.4
6		Отключение блока 1200 МВт Белорусской АЭС	1128	858	-30.4 ... + 22.7
7		Отключение двух блоков 1200 МВт Белорусской АЭС	332	306	-22.2 ... -3.9
8		Отключение АТ11 Смоленской АЭС и блока 1200 МВт Белорусской АЭС	737	1028	-13 ... + 22.8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Использование асимметричного ФПТ (регулирующего поперечную составляющую напряжения) при углах более 20 градусов возможно только последовательно с АТ, оснащенным РПН (регулирующим продольную составляющую напряжения). Однако в некоторых режимах РПН АТ должен находиться в крайних положениях, что не всегда допустимо на практике по условиям работы данного устройства.
2. Диапазон использования ФПТ при значительном дефиците генерирующей мощности Белорусской энергосистемы (при отключении двух блоков по 1200 МВт Белорусской АЭС) ограничивается перегрузочной способностью АТ 500/330 кВ Смоленской АЭС.
3. Применение гексагонального ФПТ на ПС 750 кВ «Белорусская» позволит регулировать загрузку критически важного элемента межсистемной связи — АТ 750/330 кВ ПС 750 кВ «Белорусская» — в наиболее тяжелых ремонтно-аварийных режимах с углами поворота напряжения до 30 градусов (в диапазоне до 60 % номинальной мощности АТ), при значительном внезапном дефиците генерирующей мощности Белорусской энергосистемы (до 2400 МВт, или 35 % максимума нагрузки энергосистемы).

Рисунки к статье предоставлены авторами.

↓ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кашин М.А., Хренников А.Ю. Использование фазоповоротных устройств для повышения режимной надежности Белорусской энергосистемы // Сборник: Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 76. Обеспечение надежности систем энергетики в условиях инновационного развития. Отв. ред. академик РАН В.А. Стенников. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2025. С. 333–340.
2. Кашин М.А., Новиков Н.Л., Новиков А.Н. Повышение режимной надежности Белорусской энергосистемы в условиях развития атомной энергетики // Электроэнергия: передача и распределение. 2023. № 1. С. 40–46.
3. Асташев М.Г., Новиков М.А., Панфилов Д.И. Применение фазоповоротных устройств с тиристорными коммутаторами в активно-адаптивных электрических сетях // Энергия единой сети. 2013. №5. С. 60–64.
4. Брилинский А.С., Герасимов А.С., Германова М.С. Уравнения гексагонального фазоповоротного трансформатора и его схема замещения // Электрические станции. 2025. №6. С. 18–28.
5. Воропай Н.И., Голуб И.И., Ефимов Д.Н., Исаков А.Б., Ядыкин И.Б. Спектральный и модальный методы в исследованиях устойчивости электроэнергетических систем и управлении ими // Автоматика и телемеханика. 2020. № 10. С. 3–34.
6. Хренников А.Ю., Вахнина В.В., Кувшинов А.А. Силовые трансформаторы на энергетических объектах: испытания, диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг: учебное пособие / Москва: Директ-Медиа, 2021. С. 336.