



Научная статья

УДК 621.316.727

<https://elibrary.ru/kzdrdi><https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-380-391>

## Оценка эффективности применения фазоворотного трансформатора для повышения пропускной способности межсистемной электропередачи

В.П. Шойко<sup>1✉</sup>, А.М. Бутакова<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

**Резюме.** Целью исследований явилась разработка мероприятий, направленных на повышение эффективности функционирования энергосистем, в частности за счет повышения пропускной способности электропередач. Для решения указанной задачи использовалась FACTS-технология на основе фазоворотного трансформатора. Исследование эффективности фазоворотного трансформатора для повышения пропускной способности межсистемной электропередачи проводилось путем определения максимально допустимых перетоков сечения Объединенная энергосистема Урала – Объединенная энергосистема Сибири. В исследуемое сечение входили электропередачи 500 кВ и протяженный транзит 220 кВ Нижневартовская ГРЭС – Томская. Расчеты выполнялись для нормальной и различных послеаварийных схем с использованием программного комплекса RastrWin3. При исследованиях учитывались регулирование отпаяк фазоворотного трансформатора и направление перетока мощности в сечении. Показано, что для рассматриваемого сечения применение фазоворотного трансформатора обеспечило работу транзита 220 кВ в замкнутом режиме, что повысило надежность электроснабжения региона, позволило увеличить максимально допустимый переток на 35...71%. Кроме того, выполнены аналогичные расчеты для варианта усиления транзита 220 кВ путем строительства параллельной линии 500 кВ. Согласно проведенным исследованиям установлено, что эффект повышения пропускной способности этого варианта составил 20...35%. Выявлено, что определяющим фактором, ограничивающим максимально допустимые перетоки в сечении при замыкании транзита 220 кВ в обычном и усиленном вариантах, является токовая перегрузка головных участков. По результатам проведенных исследований даны рекомендации по предпочтительному использованию разомкнутого режима транзита. Таким образом, для повышения эффективности функционирования энергосистем предложено повышение пропускной способности электропередач на основе применения фазоворотного трансформатора и определен сегмент Единой национальной энергосистемы России, где их использование технологически целесообразно.

**Ключевые слова:** энергосистема, межсистемная электропередача, фазоворотный трансформатор, пропускная способность, максимально допустимый переток, сечение

**Для цитирования:** Шойко В.П., Бутакова А.М. Оценка эффективности применения фазоворотного трансформатора для повышения пропускной способности межсистемной электропередачи // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 380–391. EDN: KZDRDI, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-380-391>.

### POWER ENGINEERING

Original article

## Feasibility of using phase-shifting transformers to increase the throughput of interconnected power transmission systems

Vladimir P. Shoiko<sup>1✉</sup>, Anastasia M. Butakova<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

**Abstract.** This paper discusses measures aimed at improving the efficiency of power systems by increasing the capacity of power transmission lines. To that end, a FACTS technology based on a phase-shifting transformer was used.

© Шойко В.П., Бутакова А.М., 2023

The feasibility of using phase-shifting transformers to increase the throughput capacity of interconnected power transmission systems was investigated by determining the maximum allowable cross-section flows of the United Energy System of the Urals – the United Energy System of Siberia. The studied cross-section included 500 kV transmission lines and the extended 220 kV Nizhnevartovskaya GRES – Tomskaya transit. Calculations were performed for normal and various post-emergency schemes using the RastrWin3 software package. The regulation of phase-shifting transformer branches and the direction of power flow in the section were taken into account. For the considered cross-section, the use of a phase-shifting transformer was shown to provide for the 220 kV transit operation in a closed mode. This improved the reliability of power supply in the region and allowed the maximum allowable overflow to be increased by 35–71%. In addition, similar calculations were carried out for the option of strengthening the 220 kV transit through the construction of a parallel 500 kV line. The effect of increasing the capacity of this option was established to reach 20–35%. The decisive factor limiting the maximum permissible cross-section flows during 220 kV transit short circuit in the normal and reinforced versions was found to be the current overload of the head sections. Recommendations on the preferable use of an open transit mode are formulated. In conclusion, the efficiency of power systems can be improved by increasing the transmission capacity of power lines through the use of phase-shifting transformers. A segment of the Unified National Power Grid of Russia, where such devices are technologically expedient, was identified.

**Keywords:** power grid, intersystem power transmission, phase-shifting transformer, capability, maximum allowed power flow, cross-section

**For citation:** Shoiko V.P., Butakova A.M. Feasibility of using phase-shifting transformers to increase the throughput of interconnected power transmission systems. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):380-391. (In Russ.). EDN: KZDRDI, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-380-391>.

## ВВЕДЕНИЕ

Управление фазами режимных параметров существенно повышает эффективность функционирования энергосистем. Основы управления фазами режимных параметров рассмотрены в работах ученых, таких как В.М. Чебан, Ю.Г. Шакарян, Дж. Вербумен и др.<sup>3</sup> [1–3]. Применение фазового управления, в том числе для повышения пропускной способности электропередач, достигается с помощью FACTS-технологий. Основы FACTS-технологий изложены в работах [4, 5]. Одним из технических устройств, реализующих фазовое управление, является фазоповоротный трансформатор (ФПТ). Он широко используется в зарубежных энергокомпаниях [6, 7].

Для России применение ФПТ является инновационной технологией. Впервые она была реализована на Волжской ГЭС<sup>4</sup> [8, 9]. Учитывая полученную высокую эффективность, «Русгидро» на своих объектах и «Системный оператор» с «Федеральной сетевой компанией Единой энергетической системы» в сегментах Единой национальной энергосистемы России планируют внедрение ФПТ, где их применение технологически и экономически целесообразно.

В настоящее время, как у нас, так и за рубежом, ведутся работы по выбору мест установки ФПТ, алгоритмам оптимизации настройки данных трансформаторов, устранению неравномерной загрузки линий, управлению режимом циркуляции потоков мощности [10–15].

Важным направлением применения ФПТ в энергосистемах является повышение пропускной способности электропередач [16–18]. Учитывая вышесказанное, можно считать актуальной задачей определение целесообразных мест установки ФПТ для повышения пропускной способности электропередач.

## ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Передача электроэнергии от мест выработки к центрам потребления в энергосистемах осуществляется по линиям электропередачи. При этом возникают проблемы, связанные с устойчивостью, недопустимым снижением напряжения в отдельных узлах или токовой перегрузкой линий. Такие проблемы имеют место на межсистемном транзите между объединенными энергосистемами (ОЭС) Урала и Сибири (рис. 1).

<sup>3</sup>Чебан В.М., Ландман А.К., Фишов А.Г. Управление режимами электроэнергетических систем в аварийных ситуациях: учеб. пособ. М.: Высшая школа, 1990. 144 с.

<sup>4</sup>В России впервые введен в эксплуатацию фазоповоротный трансформатор [Электронный ресурс]. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2019/05/22/v-rossii-vpervye-vveden-v-ekspluatatsiyu-fazopovorotnyj-transformator/> (04.02.2021).

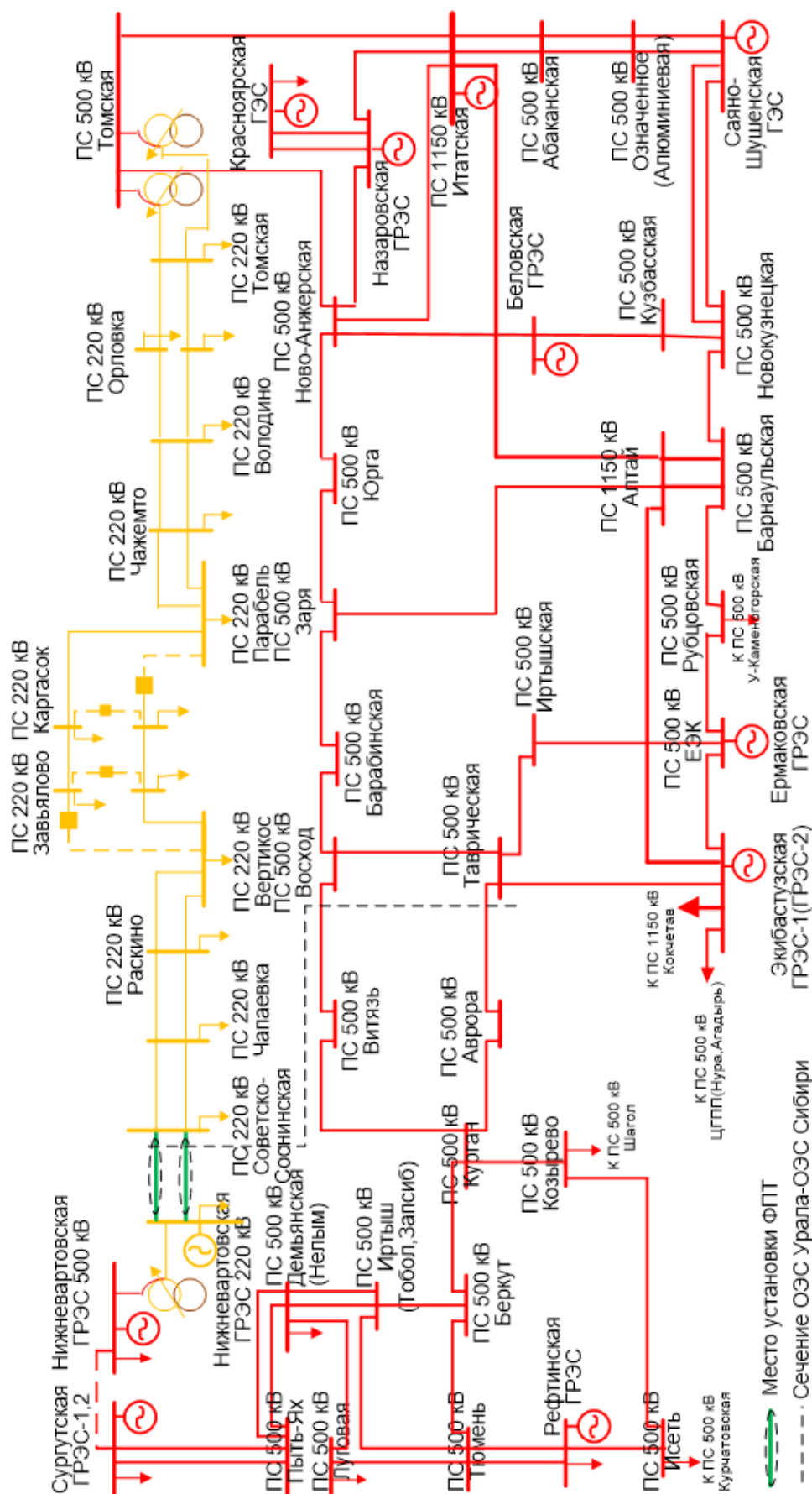


Рис. 1. Фрагмент системообразующей электрической сети Объединенной энергосистемы Урала и Объединенной энергосистемы Сибири  
 Fig. 1. A subnet of the system-forming power grid of the United Energy System of the Urals and Siberia

Учитывая большую протяженность и малую пропускную способность, воздушная линия (ВЛ) 220 кВ Нижневартовская ГРЭС – Томская не может служить в качестве транзитной для параллельной работы ОЭС Сибири и Урала из-за вероятности перегрузки линий 220 кВ на головных участках транзита, как в нормальной схеме, так и при отключении одной из цепей. Это обусловило разомкнутый режим работы транзита 220 кВ, что снижает надежность электроснабжения потребителей.

Точкой разделения электрических потоков этих энергосистем являются подстанции (ПС) 220 кВ Парабель и ПС 220 кВ Вертикос. При этом потребители Томской области севернее этих подстанций получают электроэнергию из Тюменской энергосистемы (ЭС), а южнее – из Томской ЭС. Всего от ВЛ 220 кВ Советско-Соснинская – Томская запитано 11 подстанций. Наиболее крупные потребители запитаны от ПС 220 кВ Советско-Соснинская, ПС 220 кВ Парабель и ПС 220 кВ Томская.

Объектом исследования является межсистемный транзит. В состав контролируемого сечения межсистемного транзита входят двухцепная ВЛ 220 кВ Советско-Соснинская-НВГРЭС220, ВЛ 500 кВ Восход-Витязь, ВЛ 500 кВ Таврическая-Аврора.

В исследуемом базовом режиме транзитный переток активной мощности составил 579 МВт (268 МВт по ВЛ 500 кВ Восход-Витязь и 311 МВт по ВЛ 500 кВ Таврическая-Аврора). Направление перетока осуществляется из Сибири на Урал. Загрузка головных участков ВЛ Советско-Соснинская-НВГРЭС220 разомкнутого транзита 220 кВ составила 112 МВт каждой цепи. Загрузка генераторов и нагрузка узлов этого режима будут отправной точкой при утяжелении режима для определения максимально допустимых перетоков (МДП).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ В СЕЧЕНИИ ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ УРАЛА – ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ СИБИРИ ПРИ РАЗОМКНУТОМ ТРАНЗИТЕ 220 КВ

Расчетная схема для проведения исследований была составлена для сети, приведенной на рис. 1. Исследования проводились с использованием программного комплекса RastrWin3. При определении МДП требуется выполнить утяжеление режима. При этом траектория утяжеления может существенно влиять на полученные результаты. В работе рассматривались два варианта направления перетока мощности: в Сибирь (основной) и на Урал. Начальная загрузка генераторов и величины нагрузок в узлах в обоих вариантах была одинакова и соответствовала базовому режиму. При перетоке «в Сибирь» утяжеление выполнялось путем увеличения генерации на электростанциях Урала и снижения генерации на электростанциях Сибири и Казахстана. При перетоке «на Урал» – наоборот. Изменение генерации выполнялось с учетом технологических ограничений. В обоих вариантах на каждом шаге утяжеления учитывался рост нагрузки на подстанциях транзита 220 кВ.

Как показали исследования, в режиме разомкнутого транзита 220 кВ основным фактором, ограничивающим МДП, явилась статическая устойчивость (СУ).

МДП для обеспечения запаса СУ оценивался по известным соотношениям<sup>5</sup> [21]:

– в нормальном режиме (НР)

$$P_M = 0,8 \cdot P_{\text{пр}} - \Delta P_{\text{нк}} + \Delta P_{\text{ПА}}; \quad (1)$$

– в послеаварийном режиме (ПАР)

$$P_M = P_{\text{д/ав}}(P_{\text{п/ав}}) - \Delta P_{\text{нк}} + \Delta P_{\text{ПА}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{п/ав}} = 0,92 \cdot P_{\text{пр}}^{\text{п/ав}}$ .

<sup>5</sup>Методические указания по устойчивости энергосистем [Электронный ресурс]. URL: <https://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/orders/pr630-030818me.pdf> (04.02.2021).

**Таблица 1.** Результаты расчета максимально допустимых перетоков в сечении Объединенной энергосистемы Урала – Объединенной энергосистемы Сибири без применения фазоповоротного трансформатора

**Table 1.** Calculation results of maximum allowed power flows in the cross section of the United Energy System of the Urals – the United Power System of Siberia free of a phase shifting transformer

Схема сети	МДП, МВт				Критерий определения МДП	Направление перетока
	3	4	$P_{\Sigma}$	с $\Delta P_{нк}$		
Нормальная схема	419	469	888	791	обеспечение запаса СУ НР	в Сибирь
Нормальная схема (0)	449	498	947	850		в Сибирь
Нормальная схема (P)	466	499	966	869	обеспечение запаса СУ НР	в Сибирь
Нормальная схема (P), (0)	467	528	995	898		в Сибирь
Откл. Восход–Витязь	310	352	662	565	обеспечение запаса СУ ПАР	в Сибирь
Откл. Восход–Витязь (0)	342	394	736	639		в Сибирь
Откл. Восход–Витязь (P)	369	419	788	691	обеспечение запаса СУ ПАР	в Сибирь
Откл. Восход–Витязь (P), (0)	371	426	797	700		в Сибирь
Откл. Таврическая–Аврора	310	352	662	565	обеспечение запаса СУ ПАР	в Сибирь
Откл. Таврическая–Аврора (0)	312	361	673	576		в Сибирь
Откл. Таврическая–Аврора (P)	338	385	723	626	обеспечение запаса СУ ПАР	в Сибирь
Откл. Таврическая–Аврора (P), (0)	371	426	797	700		в Сибирь
Нормальная схема	-542	-671	-1213	-873	обеспечение запаса СУ НР	на Урал
Откл. Восход–Витязь	-421	-491	-912	-815	обеспечение запаса СУ ПАР	на Урал
Откл. Таврическая–Аврора	-385	-447	-832	-735	обеспечение запаса СУ ПАР	на Урал

*Примечания.*

*Линии, входящие в контролируемое сечение:*

1 – ВЛ 220 кВ Советско-Соснинская–НВГРЭС220 1 цепь (переток не учитываем в МДП, т.к. нет транзита);

2 – ВЛ 220 кВ Советско-Соснинская–НВГРЭС220 2 цепь (переток не учитываем в МДП, т.к. нет транзита);

3 – ВЛ 500 кВ Восход–Витязь;

4 – ВЛ 500кВ Таврическая–Аврора.

*Условные обозначения в названиях схем сети и критериях определения МДП:* (P) – отключение реакторов в ходе утяжеления на ПС Витязь, Курган, Аврора; (0) – нулевой переток в сечении; СУ НР – статическая устойчивость в нормальном режиме; СУ ПАР – статическая устойчивость в послеаварийном режиме.

В расчетах  $\Delta P_{нк}$  принималась равной 97 МВт. При ее определении учитывалось максимальное собственное потребление ОЭС Сибири и Урала<sup>6</sup> [22]. Здесь и в последующих расчетах действие ПА по повышению МДП не оценивалось.

Результаты расчетов МДП в различных режимах приведены в табл. 1.

Проведенные исследования показали, что нарушение устойчивости происходило из-за снижения напряжения на ПС 500 кВ, примыкающих к сечению (особенно на ПС Витязь, Аврора, Курган). Контроль за уровнями напряжения на этих подстанциях и отключение только одного реактора на указанных подстанциях существенно повышают МДП.

<sup>6</sup>Приказ Минэнерго России от 30.06.2020 № 508 «Об утверждении Схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2020-2026 годы» [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/19166-document-126217.pdf> (07.01.2023).



Кроме того, выявлена зависимость МДП от исходного режима, от которого выполнялось утяжеление. Таким образом, при исходном режиме с нулевым перетоком между ОЭС во всех рассмотренных режимах получены значения МДП большие по величине по отношению к базовому режиму.

Расчеты по определению МДП при перетоке «на Урал» (здесь и далее) носят прикладной характер. Анализ результатов расчета позволяет сделать вывод о том, что полученные значения МДП близки к значениям при перетоке «в Сибирь».

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ В СЕЧЕНИИ ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ УРАЛА – ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ СИБИРИ ПРИ ЗАМКНУТОМ ТРАНЗИТЕ 220 КВ БЕЗ ФАЗОПОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Замыкание транзита 220 кВ способствует повышению надежности электроснабжения потребителей, запитанных от него. Но при этом, как показали исследования, существенно снижается пропускная способность транзита ОЭС Урала – ОЭС Сибири. Выявлено, что основным фактором, ограничивающим МДП, явилась токовая перегрузка головных участков ВЛ транзита 220 кВ. При этом МДП, обеспечивающий длительно-допустимую токовую нагрузку (ДДТН) ВЛ, оценивался по соотношениям [21]:

$$P_M = P(I_{\text{доп}}) - \Delta P_{\text{нк}} \quad (3)$$

или

$$P_M = P_{\text{д/ав}}(I_{\text{п/ав}}^{\text{доп}}) - \Delta P_{\text{нк}} + \Delta P_{\text{па}}. \quad (4)$$

Результаты расчетов МДП в различных режимах приведены в табл. 2.

Также по результатам расчетов следует отметить:

- практически во всех режимах величины МДП ниже, чем при разомкнутом режиме работы транзита 220 кВ;

- при отключении одной из цепей ВЛ НВГРЭС220-Советско-Соснинская и утяже-

лении режима суммарный переток в сечении даже не успел сменить направление, как произошла перегрузка по току оставшейся в работе цепи. Такой режим недопустим из-за существенного снижения пропускной способности транзита. Для обеспечения достаточного уровня пропускной способности сечения следует разомкнуть транзит 220 кВ.

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ В СЕЧЕНИИ ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ УРАЛА – ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ СИБИРИ ПРИ ЗАМКНУТОМ ТРАНЗИТЕ 220 КВ С ФАЗОПОВОРОТНЫМ ТРАНСФОРМАТОРОМ**

При исследованиях использовалась модель ФПТ с тиристорным коммутатором, разработанная в Энергетическом научно-исследовательском институте им. Г.М. Кржижановского. Технические характеристики фазоповоротного устройства приведены в работах [19, 20].

Устройство реализует сдвиг по фазе в диапазоне от  $-40$  до  $+40^\circ$  и содержит  $\pm 15$  отпаяк. В зависимости от номера отпайки суммарное сопротивление и значения коэффициентов трансформации ФПТ приведены в [18].

Как следует из предыдущих расчетов, основным фактором, ограничивающим МДП, явилась токовая перегрузка головных участков ВЛ транзита 220 кВ. Поэтому функция ФПТ должна заключаться в сдерживании роста тока головных участков ВЛ транзита 220 кВ. Это подтвердили проведенные расчеты. Также имела место токовая перегрузка головных участков, но за счет регулирования отпаяк ФПТ удалось обеспечить большие величины МДП активной мощности в рассматриваемом сечении. При этом зависимости МДП от номера отпайки ФПТ приведены на рис. 2.

При перетоке «в Сибирь» и отключении 1-й цепи Советско-Соснинская–НВГРЭС220 величина МДП мала. Поэтому для обеспечения достаточного уровня пропускной способности сечения следует разомкнуть транзит 220 кВ.

**Таблица 2.** Результаты расчета максимально допустимых перетоков в сечении Объединенной энергосистемы Урала – Объединенной энергосистемы Сибири без применения фазоповоротного трансформатора

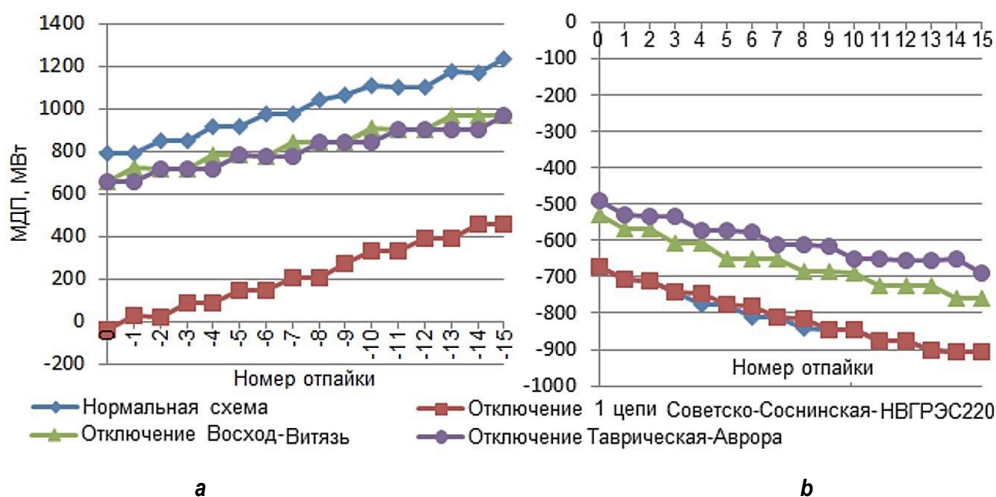
**Table 2.** Calculation results of maximum allowed power flows in the cross section of the United Energy System of the Urals – the United Energy System of Siberia free of a phase shifting transformer

Схема сети	МДП, МВт						Критерий определения МДП	Направление перетока
	1	2	3	4	$P_{\Sigma}$	$\Sigma \Delta P_{\text{нл}}$		
Нормальная схема	232	232	164	191	819	723	ДДТН цепей Советско-Соснинская-НВГРЭС220	в Сибирь
Отключение Советско-Соснинская-НВГРЭС220 (1 цепь)	122	122	-86	-99	59	-38	ДДТН 2-й цепи Советско-Соснинская-НВГРЭС220	
Отключение Восход-Витязь	223	223	143	167	756	659	ДДТН цепей Советско-Соснинская-НВГРЭС220	
Отключение Таврическая-Аврора	223	223	143	167	756	659	ДДТН цепей Советско-Соснинская-НВГРЭС220	
Нормальная схема	44	44	-395	-461	-768	-671	ДДТН цепей Томская-Орловка	на Урал
Отключение Советско-Соснинская-НВГРЭС220 (1 цепь)	44	44	-395	-461	-768	-671	ДДТН цепей Томская-Орловка	
Отключение Восход-Витязь	48	48	-333	-388	-625	-528	ДДТН цепей Томская-Орловка	
Отключение Таврическая-Аврора	50	50	-318	-370	-588	-491	ДДТН цепей Томская-Орловка	

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ В СЕЧЕНИИ ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ УРАЛА – ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ СИБИРИ ПРИ УСИЛЕННОМ ТРАНЗИТЕ

Учитывая перспективный рост нагрузки Томского и в целом Сибирского региона, встает задача по передаче больших мощно-

стей по межсистемным и внутрисистемным линиям для обеспечения растущего спроса на электроэнергию. Решение данной задачи возможно путем увеличения пропускной способности электропередач. С целью увеличения пропускной способности северного транзита можно предложить строительство линии 500 кВ с отбором мощности на ПС Парабель (рис. 3).



**Рис. 2.** Эффективность фазоповоротного трансформатора в нормальной и послеаварийных схемах: а – максимально допустимые перетоки сечения Объединенной энергосистемы Урала – Объединенной энергосистемы Сибири при изменении отпайки фазоповоротного трансформатора (переток в Сибирь); б – максимально допустимые перетоки сечения Объединенной энергосистемы Урала – Объединенной энергосистемы Сибири при изменении отпайки фазоповоротного трансформатора (переток на Урал)

**Fig. 2.** Efficiency of the phase shifting transformer in normal and post-emergency circuits: а – maximum allowed power flows in the cross-section of the United Energy System of the Urals – the United Energy System of Siberia when changing phase shifting transformer taps (flow to Siberia); б – maximum allowed power flows in the cross-section of the United Energy System of the Urals – the United Energy System of Siberia when changing phase shifting transformer taps (flow to the Urals)

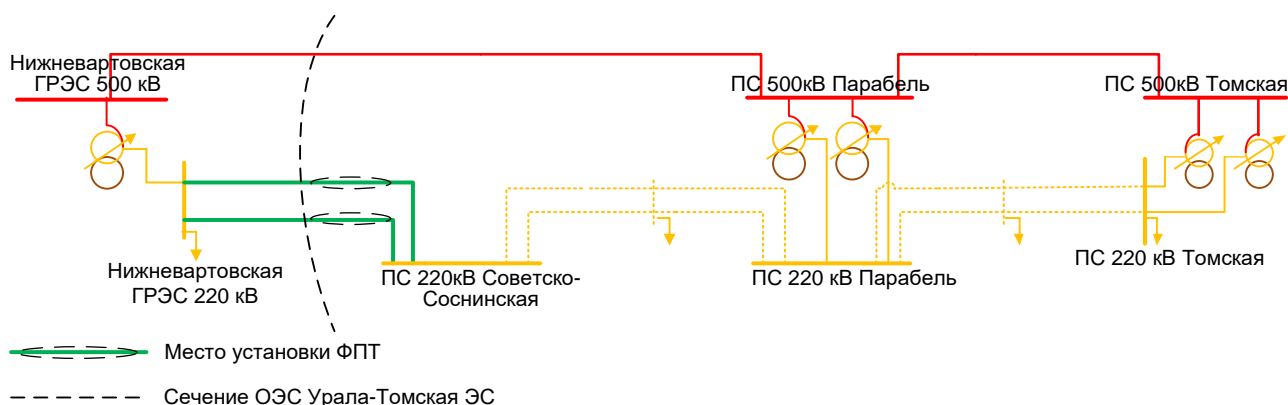


Рис. 3. Вариант усиления транзита энергосистемы ОЭС Урала–Томская  
Fig. 3. An option of transit amplification of the Ural – Tomsk United Energy System

В работе выполнена оценка пропускной способности усиленного транзита. Пропускная способность оценивалась путем расчета МДП без применения и с применением ФПТ. При исследованиях учитывалось направление перетока «в Сибирь». Результаты расчетов МДП без применения ФПТ приведены в табл. 3.

При замыкании транзита 220 кВ наблюдается существенное недоиспользование пропускной способности ВЛ 500 кВ сечения ОЭС Сибири – ОЭС Урала. При отключении 1 цепи Советско-Соснинская-НВГРЭС220 величина МДП мала. Поэтому для обеспечения достаточного уровня пропускной способности сечения следует разомкнуть транзит 220 кВ.

Таблица 3. Результаты расчета максимально допустимых перетоков в сечении Объединенной энергосистемы Урала – Объединенной энергосистемы Сибири без применения фазоворотного трансформатора  
Table 3. Calculation results of maximum allowed power flows in the cross section of the United Energy System of the Urals – the United Energy System of Siberia free of a phase shifting transformer

Режим транзита	Схема сети	МДП, МВт							Критерий определения МДП
		1	2	3	4	5	$P_{\Sigma}$	с $\Delta P_{нк}$	
Разомкнут	Нормальная схема	–	–	630	715	1170	2515	1915	обеспечение запаса СУ НР
	Откл. Советско-Соснинская–НВГРЭС220 (1 цепь)	–	–	630	715	1170	2515	1915	обеспечение запаса СУ НР
	Откл. Восход–Витязь	–	–	434	502	908	1844	1747	обеспечение запаса СУ ПАР
	Откл. Таврическая–Аврора	–	–	413	479	871	1763	1666	обеспечение запаса СУ ПАР
	Откл. НВГРЭС500–Парабель	–	–	282	330	617	1229	1132	обеспечение запаса СУ ПАР
Замкнут	Нормальная схема	236	236	395	460	741	2068	1971	ДДТН цепей Советско-Соснинская–НВГРЭС220
	Откл. Советско-Соснинская–НВГРЭС220 (1 цепь)	128	128	68	82	204	610	513	ДДТН 2 цепь Советско-Соснинская–НВГРЭС220
	Откл. Восход–Витязь	217	217	342	399	653	1828	1731	ДДТН цепей Советско-Соснинская–НВГРЭС220
	Откл. Таврическая–Аврора	211	211	324	379	624	1749	1652	ДДТН цепей Советско-Соснинская–НВГРЭС220
	Откл. НВГРЭС500–Парабель	150	150	134	160	314	908	811	ДДТН цепей Советско-Соснинская–НВГРЭС220

Примечание: 5 – ВЛ 500 кВ НВГРЭС500 – Парабель.



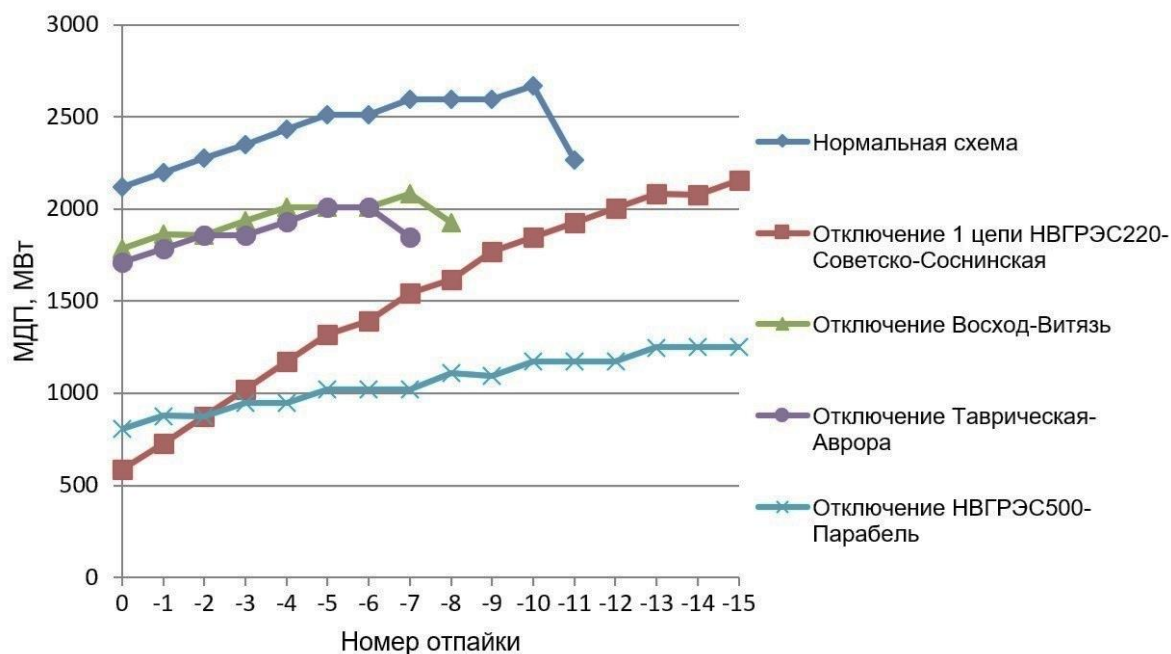


Рис. 4. Эффективность фазоповоротного трансформатора в нормальной и послеаварийных схемах усиленного транзита

Fig. 4. Efficiency of the phase shifting transformer in normal and post-emergency circuits of enhanced transit

**Таблица 4.** Сводная таблица основных результатов по оценке эффективности фазоповоротного трансформатора для повышения пропускной способности межсистемной электропередачи

**Table 4.** Summary table of key evaluation results of phase shifting transformer efficiency to increase the capability of intersystem power transmission

Режим транзита 220 кВ	Схема	Максимально допустимый переток					Примечание
		без ФПТ	с ФПТ		повышение МДП %	повышение МДП по отношению к разомкнутому режиму %	
			МВт	Отпайка			
Замкнут	Нормальная	723	1236	-15	71	44	переток в Сибирь
	Откл. Советско-Соснинская-НВГРЭС220 (1 цепь)	-38	445	-15	–	–	переток в Сибирь, транзит разомкнуть
	Откл. Восход–Витязь	659	967	-15	47	40	переток в Сибирь, транзит разомкнуть
	Откл. Таврическая–Аврора	659	967	-15	47	54	переток в Сибирь
	Нормальная	-671	-907	15	35	4	переток на Урал
	Откл. Советско-Соснинская–НВГРЭС220 (1 цепь)	-671	-907	15	35	4	переток на Урал
	Откл. Восход–Витязь	-528	-758	15	44	-7	переток на Урал
	Откл. Таврическая–Аврора	-491	-690	15	41	-6	переток на Урал
Замкнут, усилен	Нормальная	1971	2669	-10	35	39	переток в Сибирь
	Откл. Советско-Соснинская-НВГРЭС220 (1 цепь)	513	2157	-15	–	13	переток в Сибирь, транзит разомкнуть
	Откл. Восход–Витязь	1731	2085	-7	20	19	переток в Сибирь
	Откл. Таврическая–Аврора	1652	2008	-6	22	21	переток в Сибирь
	Откл. Парабель–НВГРЭС500	811	1253	-15	–	11	переток в Сибирь, транзит разомкнуть

Для загрузки ВЛ 500 кВ был применен ФПТ. Путем регулирования отпаяк ФПТ удалось обеспечить перераспределение потоков мощности, разгружая транзит 220 кВ и загружая транзитные ВЛ 500 кВ. Результаты исследований МДП сечения ОЭС Урала – ОЭС Сибири при изменении отпаяк ФПТ приведены на рис. 4.

В рассмотренных режимах основной причиной ограничения МДП была токовая перегрузка цепей НВГРЭС220–Советско-Соснинская. Только при крайних из рассчитанных отпаяк ФПТ для нормальной и послеаварийных схем, связанных с отключением ВЛ 500 кВ Восход–Витязь и Таврическая–Аврора, ограничивающим фактором МДП стала статическая устойчивость.

По результатам проведенных исследований была составлена сводная таблица по оценке эффективности ФПТ для повышения пропускной способности межсистемной электропередачи (табл. 4). Анализ приведенных результатов исследования позволил сделать выводы, которые приведены в заключении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные исследования выявили одно из мест целесообразной установки ФПТ

для повышения пропускной способности электропередачи – транзит 220 кВ Нижневартовская ГРЭС – Томская. Применение ФПТ обеспечило принципиальную возможность работы транзита 220 кВ в замкнутом режиме, что повысило надежность электроснабжения региона. При этом повышение пропускной способности для рассматриваемого сечения составило 35...71%.

2. Предложен вариант усиления транзита 220 кВ путем строительства параллельной линии 500 кВ. Для этого варианта выполнены аналогичные расчеты по определению МДП для нормальной и послеаварийных схем. Эффект повышения пропускной способности этого варианта составил 20...35%.

3. Показана эффективность применения ФПТ для повышения пропускной способности сечения ОЭС Урала – ОЭС Сибири по отношению к разомкнутому режиму работы транзита 220 кВ. Даны рекомендации по предпочтительному использованию разомкнутого режима транзита.

4. Выявлено, что определяющим фактором, ограничивающим МДП в сечении ОЭС Урала – ОЭС Сибири при замыкании транзита 220 кВ в обычном и усиленном варианте является токовая перегрузка головных участков.

## Список источников

1. Бушуев В.В., Калужный А.Х., Кречмер Л.В., Шушуев А.А. Применение фазоповоротных устройств для упрощения потокораспределения в энергосистемах // Электричество. 1990. № 11. С. 6–11.
2. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Режимы работы управляемых линий электропередачи // Электричество. 1997. № 9. С. 3–8.
3. Verboomen J., Hertem D., Schavemaker P.H., Kling W.L., Belmans R. Phase shifting transformers: principles and applications // International Conference on Future Power Systems. 2005. <https://doi.org/10.1109/FPS.2005.204302>.
4. Hingorani N.G., Gyugui L. Understanding facts: concepts and technology of flexible ac transmission systems // The Institute of Electrical and Electronics Engineers. Wiley-IEEE Press, 2004. 464 p.
5. Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Хвошинская З.Г. Разработка рекомендаций по применению устройств FACTS на межсистемных связях ОЭС Урала, Средней Волги и Центра // Вестник ИГЭУ. 2005. № 6. С. 32–36.
6. Добрусин Л.А. Проблемы энергоэффективности и энергосбережения в России. Информационно-аналитический обзор. Часть III. Тенденции применения фазоповоротных трансформаторов в электроэнергетике // Силовая электроника. 2012. № 4. С. 60–66.
7. Брилинский А.С., Крицкий В.А., Смирнова Л.С. Особенности применения фазоповоротных комплексов в электроэнергетических системах // Известия НТЦ Единой Энергетической системы. 2018. № 1. С. 6–10.
8. Крицкий В.А., Евдокунин Г.А., Брилинский А.С., Смирнова Л.С. Применение фазоповоротного трансформатора в схеме выдачи мощности Волжской ГЭС // Электрические станции. 2018. № 12. С. 26–30.
9. Брилинский А.С., Евдокунин Г.А., Крицкий В.А., Матвиенков Ю.В., Сидельников А.П., Смирнова Л.С. Фазоповоротный трансформатор в схеме выдачи мощности крупной гидроэлектростанции // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2019. № 1. С. 6–14.
10. Акимов Д.А., Коровкин Н.В., Одинцов М.В., Фролов О.В. Методика выбора мест установки и параметров фазоповоротных трансформаторов в электрических сетях // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2016. № 1. С. 6–19.
11. Wolfram M., Marten A-K., Westermann D. A comparative study of evolutionary algorithms for phase shifting transformer

- setting optimization // IEEE International Energy Conference. 2016. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2016.7514056>.
12. Rezvanfar R, Ghasemi H, Mosayebian M.E, Ghomi M, Silva F.M.F., Bak C.L. Optimal placement of phase shifting transformers based on MADM method: the considering system performance indices // CIGRE Symposium Aalborg (Aalborg, 4–7 June 2019). Aalborg, 2019. Session 4 (C1). P. 068.
13. Thatarad S., Kiatyuth K. Load alleviation in transmission system by using phase shifting transformer // International Electrical Engineering Congress (Krabi, 7–9 March 2018). Krabi: IEEE, 2018. P. 60–70. <https://doi.org/10.1109/IEECON.2018.8712121>.
14. Morrell T.J., Eggebraaten J.G. Applications for phase-shifting transformers in rural power systems // IEEE Rural Electric Power Conference (Bloomington, 28 April – 1 May 2019). Bloomington: IEEE, 2019. P. 70–74. <https://doi.org/10.1109/REPC.2019.00020>.
15. Рахманов Н.Р., Ильясов О.В., Гулиев Г.Б. Применение регулирования фазового угла напряжения в энергосистеме с неравномерно загруженной питающей сетью // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: вып. 71. Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации: в 3-х т. / отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2020. Т. 2. С. 350–360.
16. Li Feng, Yu Mengze, Li Zuohong, Yuan Jiaxin, Mei Jiajun, Yang Xinyi, et al. Engineering Application Evaluation of Phase Shifting Transformer in Guangdong Power Grid // Conference Proceedings of 2021 International Joint Conference on Energy, Electrical and Power Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer, 2022. Vol. 916. P. 111–117. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-3171-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-19-3171-0_10).
17. Воденников Д.А. Применение фазоповоротного устройства для увеличения пропускной способности электрической сети // Вестник МЭИ. 2020. № 3. С. 75–80. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-3-75-80>.
18. Шойко В.П., Духанина К.В. Оценка эффективности применения фазоповоротного трансформатора для повышения пропускной способности электропередачи с учетом режима прилегающей сети // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 3. С. 369–379. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-369-379>.
19. Стельмаков В.Н., Жмуров В.П., Тарасов А.Н., Гринштейн Б.И., Тузлукова Е.В. Фазоповоротные устройства с тиристорным управлением // Энергетик. 2010. № 8. С. 20–23.
20. Ремизевич Т., Рашитов П. Особенности управления полупроводниковым ФПУ со средней точкой // Силовая Электроника. 2011. № 1. С. 78–82.

## References

1. Bushuev V.V., Kalyuzhny A.Kh., Krechmer L.V., Shushuev A.A. The use of phase-shifting devices to simplify flow distribution in power systems. *Elektrichestvo*. 1990;11:6-11. (In Russ.).
2. Kochkin V.I., Shakaryan Yu.G. Operating condition of controlled power transmission lines. *Elektrichestvo*. 1997;9:3-8. (In Russ.).
3. Verboomen J., Hertem D., Schavemaker P.H., Kling W.L., Belmans R. Phase shifting transformers: principles and applications. In: *International Conference on Future Power Systems*. 2005. <https://doi.org/10.1109/FPS.2005.204302>.
4. Hingorani N.G., Gyugui L. Understanding facts: concepts and technology of flexible AC transmission systems. In: *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*. Wiley-IEEE Press; 2004, 464 p.
5. Misrikhanov M.Sh., Sitnikov V.F., Khvoshchinskaya Z.G. Developing recommendations for the use of FACTS devices on intersystem interconnections of the Ural, Middle Volga and Central UPS. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2005;6:32-36. (In Russ.).
6. Dobrusin L.A. Problems of energy efficiency and energy saving in Russia. Information and analytical review. Part III. Application trends of phase-shifting transformers in electric power industry. *Silovaya elektronika*. 2012;4:60-66. (In Russ.).
7. Brilinskii A.S., Kritskii V.A., Smirnova L.S. Application features of phase-shifting complexes in electric power systems. *Izvestiya NTC Edinoj energeticheskoy sistemi = STC of Unified Power System Proceedings*. 2018;1:6-10. (In Russ.).
8. Kritskii V.A., Evdokunin G.A., Brilinskii A.S., Smirnova L.S. Using phase-shifting transformer in the power evacuation system of Volzhskaya HPP. *Elektricheskie stantsii = Power Technology and Engineering*. 2018;12:26-30. (In Russ.).
9. Brilinskiy A.S., Evdokunin G.A., Kritskiy V.A., Matvienkov Yu. V., Sidelnikov A.P., Smirnova L.S. Phase-shifting transformer for power distribution scheme of large hydroelectric power plant. *Izvestiya Nauchno-tekhnicheskogo centra Edinoj energeticheskoy sistemy*. 2019;1:6-14. (In Russ.).
10. Akimov D.A., Korovkin N.V., Odintsov M.V., Frolov O.V. The method of choosing the placement and parameters of phase-shifting transformers. *Izvestiya Nauchno-tekhnicheskogo centra Edinoj energeticheskoy sistemy*. 2016;1:6-19. (In Russ.).
11. Wolfram M., Marten A-K., Westermann D. A comparative study of evolutionary algorithms for phase shifting transformer setting optimization. In: *IEEE International Energy Conference*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2016.7514056>.
12. Rezvanfar R, Ghasemi H, Mosayebian M.E, Ghomi M, Silva F.M.F., Bak C.L. Optimal placement of phase shifting transformers based on MADM method: the considering system performance indices. In: *CIGRE Symposium Aalborg*. 4–7th June 2019, Aalborg. Aalborg, 2019;4(C1):068.
13. Thatarad S., Kiatyuth K. Load alleviation in transmission system by using phase shifting transformer. In: *International Electrical Engineering Congress*. 7–9 March 2018, Krabi. Krabi: IEEE; 2018, p. 60-70. <https://doi.org/10.1109/IEECON.2018.8712121>.
14. Morrell T.J., Eggebraaten J.G. Applications for phase-shifting transformers in rural power systems. In: *IEEE Rural Electric Power Conference*. 28 April – 1 May 2019, Bloomington. Bloomington: IEEE; 2019, p. 70-74. <https://doi.org/10.1109/REPC.2019.00020>.

15. Rakhmanov N.R., Il'yasov O.V., Guliev G.B. Application of voltage phase angle control in a power system with an unevenly loaded power supply network. In: Voropaj N.I. (eds.). *Methodical issues of studying large energy system reliability: no. 71. Reliability of energy supply to consumers in terms of their digitalization*. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2020, vol. 2, p. 350-360. (In Russ.).
16. Li Feng, Yu Mengze, Li Zuhong, Yuan Jiaxin, Mei Jiajun, Yang Xinyi, et al. Engineering application evaluation of phase shifting transformer in Guangdong power grid. In: *Conference Proceedings of 2021 International Joint Conference on Energy, Electrical and Power Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore: Springer; 2022, vol. 916, p. 111-117. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-3171-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-19-3171-0_10).
17. Vodennikov D.A. Application of a phase-shifting device to increase the electrical network throughput rate. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta = Bulletin of MPEI*. 2020;3:75-80. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-3-75-80>. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-3-75-80>.
18. Shoiko V.P., Dukhanina K.V. Use of a phase shifting transformer for increasing the power transmission capability, taking into account the mode of the adjacent network. *iPolytech Journal*. 2021;25(3):369-379. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-369-379>.
19. Stelmakov V.N., Zhmurov V.P., Tarasov A.N., Grinshtein B.I., Tuzlukova E.V. Phase shifting devices with a thyristor control. *Energetik*. 2010;8:20-23. (In Russ.).
20. Remizevich T., Rashitov P. Control features of a semiconductor phase shifting devices with a midpoint. *Silovaya Elektronika = Power Electronics*. 2011;1:78-82. (In Russ.).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ****Шойко Владимир Петрович,**

к.т.н., доцент,  
доцент кафедры «Автоматизированные  
электроэнергетические системы»,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия  
✉ shoiko@ngs.ru  
<https://orcid.org/0009-0003-6709-6043>

**Бутакова Анастасия Михайловна,**

магистрант,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия  
anastasia.butakova98@mail.ru

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в  
подготовку публикации.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта  
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный  
вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 09.02.2023; одобрена  
после рецензирования 24.03.2023; принята к публи-  
кации 02.05.2023.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS****Vladimir P. Shoiko,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of  
Automated Electric Power Systems,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, K. Marks pr., Novosibirsk 630073, Russia  
✉ shoiko@ngs.ru  
<https://orcid.org/0009-0003-6709-6043>

**Anastasia M. Butakova,**

Master's Degree Student,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, K. Marks pr., Novosibirsk 630073, Russia  
anastasia.butakova98@mail.ru

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflicts of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all  
the co-authors.*

**Information about the article**

The article was submitted 09.02.2023; approved after  
reviewing 24.03.2023; accepted for publication  
02.05.2023.