

Научная статья

УДК 621.31

doi:10.17213/0136-3360-2023-2-68-75

## ОЦЕНКА СЕЛЕКТИВНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 220 кВ С УСТРОЙСТВОМ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

**Игорь Юрьевич Иванов, Виталий Викторович Новокрещенов**✉

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия, vitnov@inbox.ru

**Аннотация.** Произведена оценка селективности действия дифференциальной защиты линии электропередачи с устройством продольной компенсации. Отмечены основные параметры, влияющие на характер электромагнитных переходных процессов и установившийся режим при коротком замыкании на линии электропередачи 220 кВ с устройством продольной компенсации. Показано, что устройства продольной компенсации влияют на снижение чувствительности дифференциальной защиты линии электропередачи преимущественно в установившемся режиме короткого замыкания, так как в первый момент повреждения возникает переходной процесс, связанный с перезарядкой используемых в устройстве конденсаторов. При этом возможен частный случай отказа дифференциальной защиты линии, что возникает под действием определённого значения транспортного угла, вызывающего переток мощности от устройства продольной компенсации к точке короткого замыкания.

**Ключевые слова:** активно-адаптивная сеть, устройства продольной компенсации, релейная защита, короткое замыкание, переходной процесс, компьютерное моделирование

**Для цитирования:** Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В. Оценка селективности дифференциальной защиты линии электропередачи напряжением 220 кВ с устройством продольной компенсации // Изв. вузов. Электромеханика. 2023. Т. 66. № 2. С. 68-75. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2023-2-68-75>.

Original article

## ESTIMATING THE SELECTIVITY OF THE 220 kV POWER LINE DIFFERENTIAL PROTECTION WITH SERIES CAPACITOR BANK

**Igor Yu. Ivanov, Vitaly V. Novokreshchenov**✉

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, vitnov@inbox.ru

**Abstract.** The paper assesses the selectivity of the power line differential protection with a series capacitor bank. The main parameters affecting the nature of electromagnetic transients and the steady state mode in case of a short circuit on the 220 kV power line with a series capacitor bank have been noted. It is shown that the series capacitor banks affect the sensitivity decrease of the power line differential protection, mainly in the steady state short circuit, since at the first moment of damage there occurs a transient process due to the capacitors recharging. In such a situation, a special case of failure of the line differential protection is possible. It occurs under the action of a transport angle certain value, causing a power flow from the series capacitor bank to the short-circuit point.

**Keywords:** active-adaptive(smart)grid, series capacitor banks, relay protection, short circuit, transient process, computer simulation

**For citation:** Ivanov I.Yu., Novokreshchenov V.V. [Estimating the Selectivity of the 220 kV Power Line Differential Protection with Series Capacitor Bank]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika = Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics*. 2023; 66(2): 68-75. (In Russ.). <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2023-2-68-75>.

## Введение

В соответствии с концепцией интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС<sup>1</sup>) одним из направлений повышения эффективности функционирования электрических сетей является насыщенность сети активными элементами на базе силовой электроники, позволяющими изменять параметры сети (напряжение по модулю и по фазе, мощность реактивная и активная, сопротивление элементов сети и др.). В частности, для увеличения пропускной способности линий электропередачи (ЛЭП) предполагается внедрение устройств продольной компенсации (УПК) для компенсации реактивного сопротивления электропередачи.

Указанные устройства значительно повышают эффективность работы электроэнергетической системы, однако их применение невозможно без проработки вопросов адаптации алгоритмов функционирования релейной защиты и автоматики (РЗА) ЛЭП. При оснащении сетей УПК с широкими возможностями регулирования параметров изменяются условия, в которых функционируют комплексы РЗА, что обусловлено изменением дифференциальных уравнений, описывающих работу электрической сети при коротких замыканиях (КЗ), появляются новые явления, такие как возникновение инверсии тока, инверсии напряжения, низкочастотных колебаний при КЗ [1]. Все эти явления могут приводить к неправильной работе дифференциальной защиты ЛЭП, являющейся основной защитой от всех видов КЗ [2]. В связи с чем актуальной представляется задача исследования системных свойств и связей электротехнических систем для оценки селективности действия дифференциальной защиты ЛЭП с УПК.

## Литературный обзор

Установка на ЛЭП УПК позволяет решить следующие проблемы [3]:

<sup>1</sup> Научно-технический отчет «Разработка концепции развития и применения систем релейной защиты и автоматики для интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью»: Кн. 1 / И.З. Глушкин, А.К. Белотелов, В.В. Косьянчук, А.В. Сапожников. М.: Энергосетьпроект, 2012. Работа выполнена по договору № 0710/2011.

– увеличение пропускной способности ЛЭП за счёт компенсации индуктивного сопротивления;

– повышение статической и динамической устойчивости между системами за счёт демпфирования электромеханических колебаний (в случае применения управляемого УПК);

– управление потоками активной мощности нескольких параллельных ЛЭП (в случае применения управляемого УПК хотя бы на одной из линий).

На сегодняшний день существуют четыре разновидности управляемых УПК: последовательный конденсатор с тиристорным переключением [4], последовательный конденсатор с управлением на запираемом тиристоре [5, 6], последовательный конденсатор с тиристорным управлением [7] и статический синхронный продольный конденсатор [8].

Устройства дифференциальной защиты ЛЭП, являющиеся защитами с абсолютной селективностью, должны с высоким быстродействием правильно функционировать при всех видах КЗ на защищаемой ЛЭП, в том числе, с произвольной степенью продольной компенсации. Однако из-за проблем в функционировании устройств РЗА, возникающих вследствие применения УПК, степень компенсации продольного сопротивления на ЛЭП 400 кВ и выше, как правило, составляет не более 50 %, что, безусловно, ограничивает максимально возможную пропускную способность ЛЭП. В нашей стране в последнее время назрел вопрос применения УПК на линиях 220 кВ [9]. Поэтому актуальной остаётся проблема по увеличению степени компенсации реактивного сопротивления ЛЭП, в том числе линий 220 кВ, что обуславливает поиск эффективных решений для обеспечения селективного действия устройств дифференциальной защиты ЛЭП с произвольной степенью продольной компенсации.

## Материалы и методы

В основе компенсации индуктивного сопротивления линии лежат теоретические основы электротехники, согласно которым 100 %-ная компенсация продольного индуктивного сопротивления контура (в данном случае ЛЭП) достигается тогда, когда последовательно включённые индуктивное и ёмкостное сопротивления равны (по модулю) между собой, т.е. когда

$$|X_L| = |X_C|$$

или

$$|j\omega L| = \left| \frac{1}{j\omega C} \right|, \quad (1)$$

где  $X_L$  – индуктивное сопротивление;  $X_C$  – ёмкостное сопротивление;  $j$  – мнимая единица;  $\omega$  – угловая частота;  $L$  – индуктивность;  $C$  – ёмкость.

Так как за счёт того, что индуктивное и ёмкостное сопротивления имеют разные знаки, при их последовательном сложении результирующее сопротивление равно нулю. Соответственно, когда их модули неравны, происходит либо неполная компенсация (недокомпенсация), либо перекомпенсация (когда ёмкостное сопротивление больше индуктивного). Хочется отметить, что если неполная компенсация имеет место быть в нормальных режимах работы, то перекомпенсация встречается при коротком замыкании, что, в свою очередь, приводит к инверсии токов по концам линии и негативно влияет на чувствительность дифференциальной релейной защиты. Целью настоящей работы является исследование системных свойств и связей электротехнических систем для оценки селективности

действия дифференциальной защиты ЛЭП с УПК. Для решения поставленной цели создана компьютерная модель (рис. 1) электротехнической системы, за основу которой была взята линия электропередач 220 кВ Ухта – Микунь, где по заявлению ФСК ЕЭС планируется установка устройств продольной компенсации [9]. На основе этой модели произведён расчёт и визуализация переходных и установившихся режимов при КЗ на ЛЭП с УПК. Принципиальная схема модели электротехнической системы включает (рис. 2):

- идеальные источники трёхфазного синусоидального напряжения номиналом 220 кВ с последовательно включёнными активно-индуктивными сопротивлениями  $Z1, Z2, Z3, Z13, Z14, Z15$  (блоки Система 1, Система 2);
- идеальные амперметры и вольтметры (блоки Подстанция 1, Подстанция 2);
- идеальные конденсаторы  $C1, C2, C3$ ;
- активно-индуктивные элементы  $Z4...Z12$ , символизирующие продольное сопротивление ЛЭП;
- блоки моделирования КЗ, позволяющие моделировать повреждения в различных местах электропередачи с учётом вида, угла возникновения и длительности КЗ.

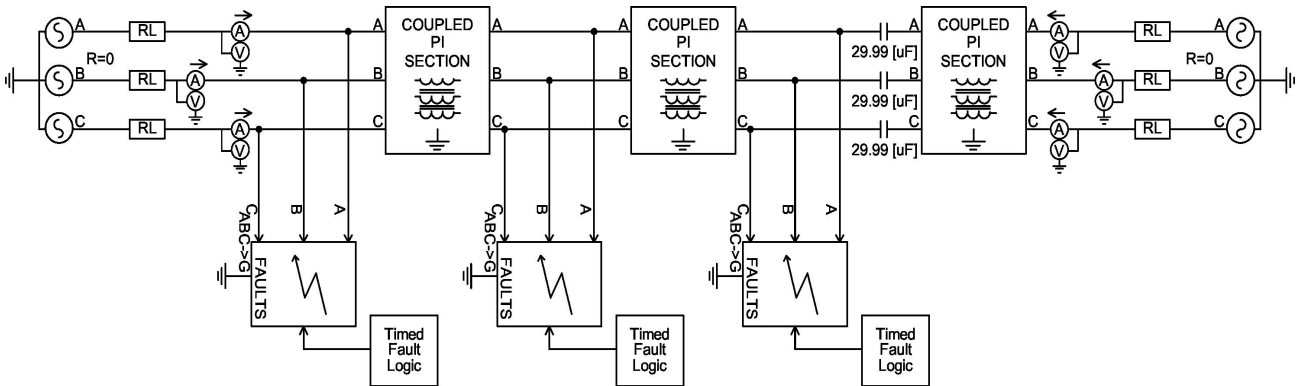


Рис. 1. Математическая модель созданная с помощью графического интерфейса компьютерного симулятора PS CAD / Fig. 1. Mathematical model created using the graphical interface of the PS CAD computer simulator

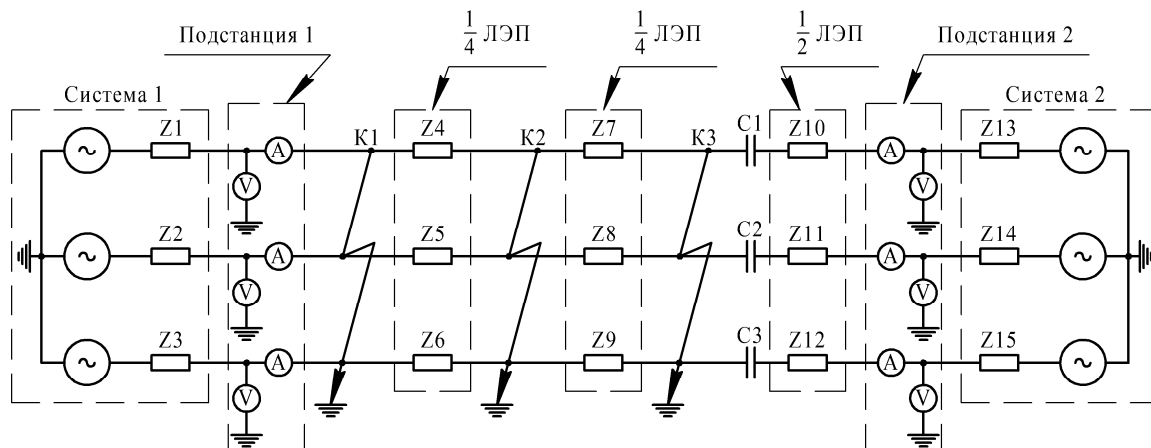


Рис. 2. Принципиальная схема модели электротехнической системы / Fig. 2. Electrical system model circuit diagram

Для анализа влияния режимов работы ЛЭП с произвольной степенью продольной компенсации на селективность действия дифференциальной защиты ЛЭП при КЗ проведены следующие исследования:

– влияния степени компенсации УПК на параметры переходных и установившихся режимов при КЗ на ЛЭП;

– влияния момента возникновения КЗ на качество аварийного режима при КЗ на ЛЭП с УПК;

– влияния перетоков активной мощности, вызванных разностью углов напряжения по концам ЛЭП, на качество аварийного режима при КЗ на ЛЭП с УПК.

При проведении исследований за положительное направление токов принято направление от шин в линию.

## Результаты

**Исследование влияния степени компенсации УПК на параметры переходных и установившихся режимов при КЗ на ЛЭП.** Для исследования влияния степени компенсации УПК на параметры переходных и установившихся режимов при КЗ на ЛЭП на протяжении всей линии поочередно имитировались трёхфазные и двухфазные КЗ при разной степени продольной компенсации в интервале от 0 до 100 % с шагом 10 %.

Установлено, что частота возникающих во время КЗ затухающих колебаний прямо пропорциональна степени продольной компенсации и обратно пропорциональна расстоянию между точкой КЗ и устройством продольной компенсации (при условии установки УПК посередине линии). С ростом степени продольной компенсации частота подсинхронных колебаний растёт до определённого предела вместе с ростом степени продольной компенсации. Так, при степени продольной компенсации 20 % и более частота подсинхронной синусоиды становится более половины промышленной частоты, из-за чего начинает наблюдаться явление амплитудной модуляции.

При этом скорость роста подсинхронной частоты зависит от расположения точки КЗ, что обуславливается степенью компенсации индуктивного сопротивления повреждённого участка со стороны УПК: когда ёмкость УПК такова, что при КЗ степень компенсации индуктивного сопротивления этого участка близка к 100 %, наблюдается максимальная частота подсинхронной

составляющей, которая по своему значению стремится к промышленной частоте. При этом наблюдается экспоненциальное нарастание амплитуды тока КЗ, а токи находятся под взаимным углом, близким к значению 90 град.

При последующем увеличении степени продольной компенсации вышеупомянутого участка происходит последующее увеличение частоты свободных колебаний и подсинхронная составляющая переходит в сверхсинхронную.

Отметим, что использование устройств продольной компенсации, помимо увеличения сквозных токов короткого замыкания, так же несмотря на инверсию (рис. 3) приводит к увеличению значений токов КЗ на защищаемой ЛЭП, что при умеренной степени продольной компенсации (менее 75 %) благоприятно сказывается на коэффициенте чувствительности дифференциальной защиты (табл. 1). Более высокие степени продольной компенсации (75 % и более), наоборот, приводят к снижению коэффициента чувствительности.

**Исследование влияния момента возникновения КЗ на качество аварийного режима при КЗ на ЛЭП с УПК.** Посредством компьютерной модели ЛЭП (степень продольной компенсации которой была зафиксирована на теоретическом максимуме – 100%) на всём протяжении линии поочередно имитировались трёхфазные и двухфазные КЗ, начало которых приходилось на разные моменты времени, когда вектор напряжения фазы *A* источников электроэнергии находился в положении от 0 до 360 град (разность углов одноимённых фаз по напряжению при этом составляла 0 град).

Как видно из диаграмм рис. 4, несмотря на инверсный характер токов в установившемся режиме, в самом начале переходного процесса токи направлены к месту КЗ. Это явление объясняется тем, что согласно теореме Фурье момент возникновения тока КЗ в первом приближении (без учёта сопутствующих резонансных гармонических колебаний) представляет собой передний фронт прямоугольного импульса заполненного синусоидой промышленной частоты. Как известно из теоремы Фурье, подобный переходной процесс (скачкообразное изменение установившегося режима) содержит бесконечное множество гармоник, кратных основной. Согласно выражению (1) при изменении частоты для сохранения равенства должны пропорционально меняться значения и других переменных, например, *L* и/или *C*, в противном случае равенство нарушается.

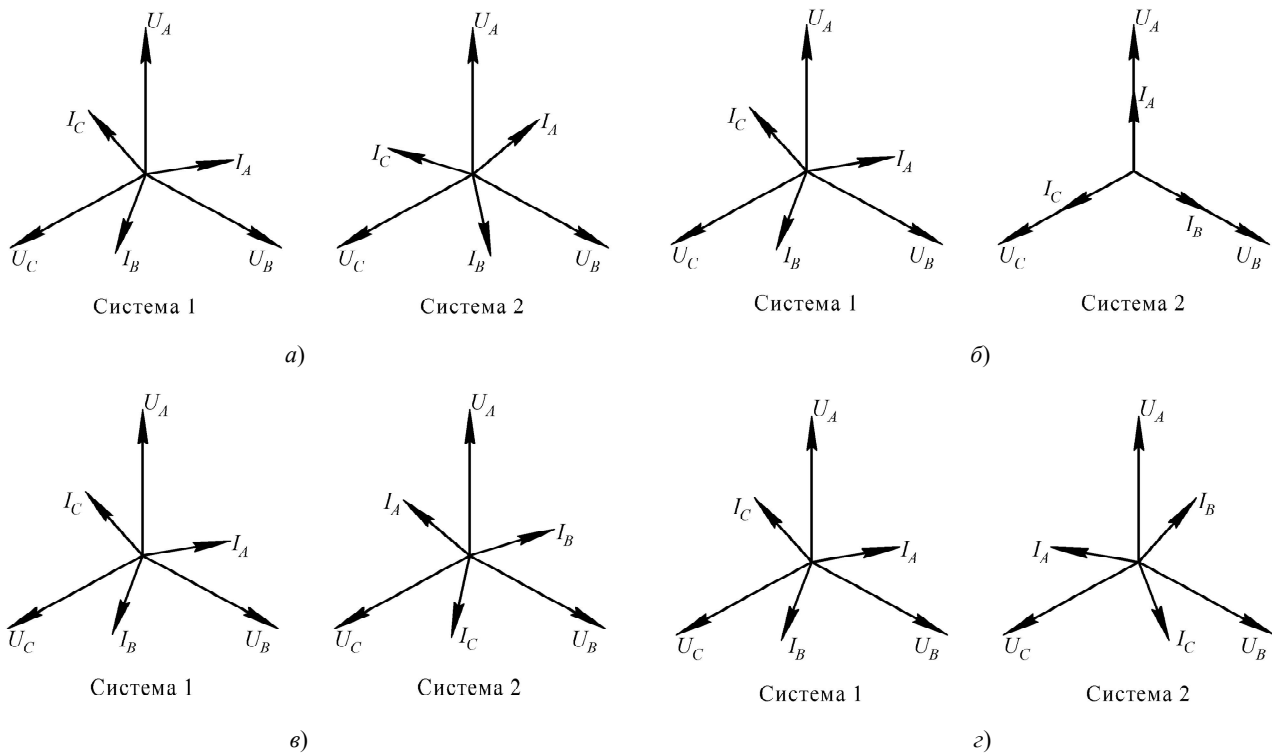


Рис. 3. Векторные диаграммы токов и напряжений (установившийся режим) в начале и конце линии при замыкании в точке КЗ (длины векторов показаны условно) со степенью компенсации: а – 40 %; б – 50 %; в – 60 %; г – 100 % / Fig. 3. Vector diagrams of currents and voltages (steady state) at the beginning and end of the line when closing at point КЗ (the lengths of the vectors are shown conventionally): а – 40 %; б – 50 %; в – 60 %; г – 100 % Vector diagrams of currents and voltages (steady state) at the beginning and end of the line when closing at point КЗ (the lengths of the vectors are shown conventionally): а – 40 %; б – 50 %; в – 60 %; г – 100 %

Таблица 1 / Table 1

**Отношение токов КЗ на компенсированной и некомпенсированной ЛЭП (установившийся режим) / The ratio of short-circuit currents on compensated and non-compensated power lines (steady state)**

Точка короткого замыкания	Степень компенсации, %										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
К2	1	1,04	1,09	1,15	1,25	1,38	1,60	1,88	1,85	1,162	0,634
К3	1	1,11	1,27	1,54	2,05	2,95	2,49	1,24	0,659	0,377	0,231

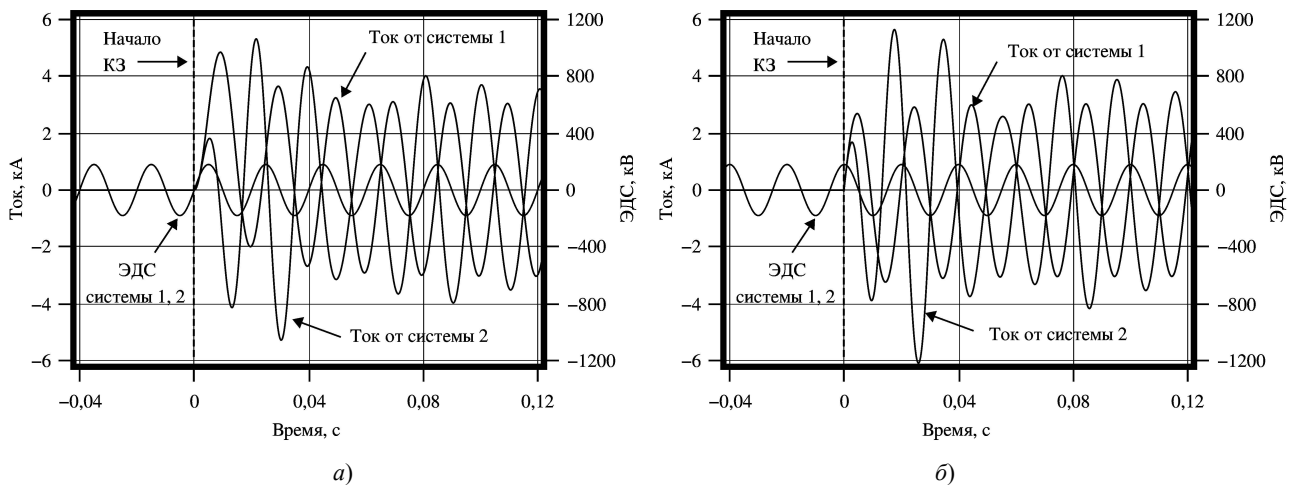


Рис. 4. Временные диаграммы токов при углах напряжения: а – 0 град; б – 90 град / Fig. 4. Time charts of currents at voltage angles: а – 0°; б – 90°

Так, уже для второй гармоники (100 Гц), содержащейся в переходном процессе, соотношение индуктивного сопротивления к ёмкостному будет составлять 4:1, т.е. уже для второй гармоники имеющиеся в ЛЭП значения продольной индуктивности и ёмкости приводят к режиму значительной недокомпенсации, и следовательно, инверсия токов для данных частот будет отсутствовать. Это обстоятельство может обеспечивать срабатывание дифференциальной защиты ЛЭП, использующей существующие алгоритмы и логику работы, что наглядно показано в табл. 2: коэффициент чувствительности дифференциальной защиты в первые 50 мс после начала КЗ снижается на незначительную величину – менее чем на 20 %.

Рисунок 4 наглядно отражает результаты проведённых исследований (табл. 2), заключающихся в том, что время возникновения короткого замыкания по большей части оказывает влияние на апериодическую составляющую токов со стороны некомпенсированного участка и в меньшей мере влияет на апериодическую составляющую токов со стороны УПК.

**Исследование влияния перетоков активной мощности, вызванных разностью углов напряжения по концам ЛЭП, на качество аварийного режима при КЗ на ЛЭП с УПК.** Формула исследования влияния перетоков активной мощности, вызванных разностью углов напряжения по концам ЛЭП, на качество аварийного режима при КЗ на ЛЭП с УПК сводилась к следующему. Исследование проводилось в четыре этапа. На первом рассматривался режим перетока активной мощности слева направо при номинальном токе ЛЭП. На втором рассматривался этот же режим, но с двойным номинальным током. На третьем и четвёртом этапах изучался режим перетока активной мощности в противоположном направлении с номинальным и двойным номинальным током.

На каждом этапе в каждой рассматриваемой точке поочерёдно имитировались трёхфазные и двухфазные КЗ.

В ходе исследования установлено, что при разности углов 16,8 град (что соответствует двойному номинальному току ЛЭП по термической стойкости) и направлении активной мощности от УПК к точке КЗ переходной процесс практически отсутствует (рис. 5, а). При этом в самом его начале и на всём протяжении установившегося режима токи практически противофазны. Это обстоятельство даёт возможность полагать, что в этом режиме идентифицировать внутреннее КЗ на ЛЭП, оперируя существующими общепринятыми алгоритмами, используемыми дифференциальной защитой ЛЭП, крайне затруднительно (табл. 3), так как дифференциальной ток в этом режиме будет стремиться к малым значениям на всём протяжении существования КЗ.

Напротив, при отрицательной разности углов, составляющей -16,8 град, и направлении активной мощности от точки КЗ к УПК в самом начале переходного процесса токи синфазны (рис. 5, б), что теоретически позволяет дифференциальной защите ЛЭП идентифицировать внутреннее КЗ (табл. 3).

В табл. 3 также показаны короткие замыкания при разности углов 21,5 град, что при замыкании в точке КЗ вызывает полную инверсию токов (токи по концам линии находятся под взаимным углом 180 град). В этом режиме наблюдается наименьшая чувствительность существующих алгоритмов дифференциальной защиты, что является одной из причин невозможности достижения экономически целесообразного теоретического максимума в контексте продольной компенсации индуктивного сопротивления линии.

Таблица 2 / Table 2

**Максимальные мгновенные значения токов КЗ при переходном процессе на ЛЭП со 100 %-ной степенью компенсации по отношению к амплитудным значениям токов КЗ в установившемся режиме на некомпенсированной ЛЭП / Maximum instantaneous values of short-circuit currents during a transient process on power lines with 100 % degree of compensation in relation to the amplitude values of short-circuit currents in steady state on a non-compensated power line**

Точка короткого замыкания	Вид короткого замыкания	Угол ЭДС, град.					
		0	30	60	90	120	150
К2	трёхфазное	1,25	1,21	1,06	0,958	1,12	1,22
	двухфазное	1,21	1,06	0,958	1,12	1,22	1,25
К3	трёхфазное	0,912	0,91	0,848	0,804	0,902	0,92
	двухфазное	0,91	0,848	0,804	0,902	0,92	0,912

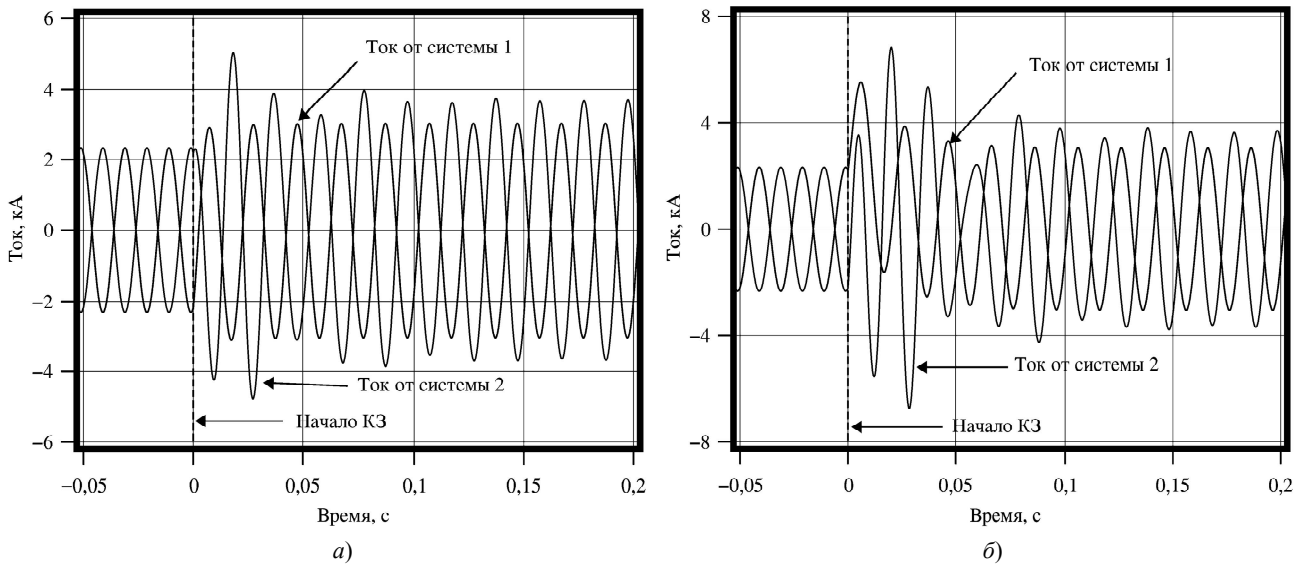


Рис. 5. Временные диаграммы токов при разности углов ЭДС источников: а – +16,8 град (направление активной мощности от УПК к точке КЗ); б – -16,8 град (направление активной мощности от точки КЗ к УПК) / Fig. 5. Flow charts of currents at the angle difference of EMF sources: а – +16,8° (directing active power from the SCB to the SC point); б – -16,8° (directing active power from the SC point to the SCB)

Таблица 3 / Table 3

**Отношение минимально возможных амплитудных значений при переходном процессе, вызванном коротким замыканием, к амплитудным значениям токов КЗ в установившемся режиме на некомпенсированной ЛЭП / The ratio of the minimum possible amplitude values during the transient caused by a short circuit to the amplitude values of the short circuit currents in the steady state on a non-compensated power line**

Точка короткого замыкания	Угол между ЭДС систем, град.							
	-24,3	-21,5	-16,8	-8,04	8,04	16,8	21,5	24,3
К2	1,389 (0,929)	1,337 (0,897)	1,227 (0,841)	1,082 (0,735)	0,789 (0,533)	0,665 (0,422)	0,541 (0,364)	0,483 (0,33)
К3	1,439 (0,441)	1,366 (0,417)	1,235 (0,376)	0,986 (0,3)	0,6 (0,167)	0,374 (0,115)	0,341 (0,105)	0,349 (0,109)

Дальнейшее расхождение векторов ЭДС одноимённых фаз вплоть до значений, побуждающих трёхкратный ток линии (24,3 град), вызывает корректировку коэффициента чувствительности в направлении его повышения (см. табл. 3).

Полученные результаты могут быть использованы как отправная точка для разработки алгоритмов функционирования релейной защиты линий электропередачи с произвольной степенью продольной компенсации, работающих в активно-адаптивных электрических сетях.

### Заключение

1. По результатам компьютерного моделирования выполнено исследование системных свойств и связей электротехнических систем, отмечены основные параметры, влияющие на характер электромагнитных переходных процессов и установившийся режим при КЗ на ЛЭП с

УПК: степень компенсации УПК, время возникновения повреждения, переток активной мощности, вызванный разностью углов напряжения по концам ЛЭП.

2. Показано, что УПК влияют на снижение чувствительности дифференциальной защиты ЛЭП преимущественно в установившемся режиме КЗ, так как в первый момент повреждения возникает переходной процесс, связанный с перезарядкой используемых в УПК конденсаторов; вне зависимости от степени продольной компенсации это вызывает толчок тока, направленный от УПК к месту КЗ.

3. Отмечено, что возможен частный случай отказа дифференциальной защиты ЛЭП, когда вышеописанный переходной процесс почти отсутствует или его величина незначительна. Это возникает под действием определённого значения транспортного угла, вызывающего переток мощности от УПК к точке КЗ.

## Список источников

1. Колобродов Е. Н. Совершенствование управления и защиты воздушных линий электропередачи с устройством продольной компенсации: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. Режим доступа: <https://www.disserscat.com/content/sovershenstvovanie-upravleniya-i-zashchity-vozdushnykh-linii-elektroperedachi-s-ustroystvom->. (дата обращения 30.08. 2022).
2. Plumptre F., Nagpal M., Chen X., Thompson M. Protection of EHV Transmission Lines with Series Compensation: BC Hydro's Lessons Learned. In: Proceedings of the 63rd Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference; 22-24 Apr 2009; Atlanta, Georgia; 2009. Доступно по: [https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6364\\_ProtectionEHV\\_MT\\_20090128\\_Web.pdf?v=20170308-163711](https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6364_ProtectionEHV_MT_20090128_Web.pdf?v=20170308-163711). Ссылка активна на 26 августа 2022.
3. Антонов А.В., Фокин В.К., Тузлукова Е.В. О применении устройств продольной емкостной компенсации в высоковольтных электрических сетях России // ЭНЕРГИЯ ЕДИНОЙ СЕТИ. 2017. №6(29). С. 26 – 41.
4. Vandana, Verma S.N. Comparative Study of Different Facts Devices // International Journal of Engineering Research & Technology. 2014. Vol. 3, N6. pp. 1819 – 1822.
5. Ahmadi A., Gandoman F. H., Khaki B., et al. Comprehensive Review of Gate-controlled series Capacitor and Applications in Electrical systems // IET Generation, Transmission & Distribution. 2017. Vol. 11, N5. pp. 1085 – 1093.
6. Zellagui M., Chaghi A. Impact of Series FACTS Devices (GCSC, TCSC and TCSR) on Distance Protection Setting Zones in 400 kV Transmission Line. In: Lu D. D.-Ch. editor. An Update on Power Quality. Croatia: InTech; 2013. P. 39 – 60.
7. Maruf N. I., Mohsin, Shoeb A., et al. Study of Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) as a Useful FACTS Device // International Journal of Engineering Science and Technology. 2010. Vol. 2, N9. pp. 4357 – 4360.
8. Nilsson S.L., de Oliveira M.M. Technical Description of Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC). In: Andersen B.R., Nilsson S.L., editors. Flexible AC Transmission Systems. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2020. P. 254 – 297.
9. Устройства продольной компенсации [Интернет ресурс]. Режим доступа: [https://www.fsk-ees.ru/innovation/intelligent\\_network/new\\_types\\_of\\_power\\_equipment\\_of\\_substations\\_and\\_overhead\\_power\\_lines/series\\_compensation\\_device/](https://www.fsk-ees.ru/innovation/intelligent_network/new_types_of_power_equipment_of_substations_and_overhead_power_lines/series_compensation_device/). (Дата обращения: 28.08.2022).

## References

1. Kolobrodov E. N. Improving the Control and Protection of Overhead Power Lines with a Series Compensation Device. Moscow; 2013. Available at: <https://www.disserscat.com/content/sovershenstvovanie-upravleniya-i-zashchity-vozdushnykh-linii-elektroperedachi-s-ustroystvom> (accessed 30.08.2022).
2. Plumptre F., Nagpal M., Chen X., Thompson M. Protection of EHV Transmission Lines with Series Compensation: BC Hydro's lessons learned. *Proceedings of the 63rd Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference; 22-24 Apr 2009; Atlanta, Georgia; 2009*. Available at: [https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6364\\_ProtectionEHV\\_MT\\_20090128\\_Web.pdf?v=20170308-163711](https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6364_ProtectionEHV_MT_20090128_Web.pdf?v=20170308-163711) (accessed 26.08.2022).
3. Antonov AV, Fokin VK, Tuzlukova EV. On the Use of Series Capacitive Compensation Devices in High-voltage Electrical Networks in Russia. *Energy of Unified Grid, scientific and technical journal*. 2017; 6(29):26-41. (In Russ).
4. Vandana, Verma S.N. Comparative Study of Different Facts Devices. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2014;3(6):1819–22.
5. Ahmadi A., Gandoman F. H., Khaki B. et al. Comprehensive Review of Gate-controlled series Capacitor and Applications in Electrical systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017;11(5):1085–93.
6. Zellagui M, Chaghi A. *Impact of Series FACTS Devices (GCSC, TCSC and TCSR) on Distance Protection Setting Zones in 400 kV Transmission Line*. In: Lu D. D.-Ch. editor. *An Update on Power Quality*. Croatia: InTech; 2013. P. 39 – 60.
7. Maruf N. I., Mohsin, Shoeb A. et al. Study of thyristor controlled series capacitor (TCSC) as a useful FACTS device. *International journal of engineering science and technology*. 2010;2(9):4357-60.
8. Nilsson SL, de Oliveira MM. *Technical Description of Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC)*. In: Andersen BR, Nilsson SL, editors. *Flexible AC Transmission Systems*. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2020. P. 254–297.
9. Series Compensation Device [Internet]. Moscow: Official Website of a Public Joint Stock Company «Federal'naya Setevaya Kompaniya Edinoi Energeticheskoi Sistemy». Available at: [https://www.fsk-ees.ru/innovation/intelligent\\_network/new\\_types\\_of\\_power\\_equipment\\_of\\_substations\\_and\\_overhead\\_power\\_lines/series\\_compensation\\_device/](https://www.fsk-ees.ru/innovation/intelligent_network/new_types_of_power_equipment_of_substations_and_overhead_power_lines/series_compensation_device/) (accessed 28.08. 2022). (In Russ).

## Информация об авторах:

**И.Ю. Иванов** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений», Казанский государственный энергетический университет, [igorivanov85@list.ru](mailto:igorivanov85@list.ru)

**В.В. Новокрещенов** – старший преподаватель кафедры «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений», Казанский государственный энергетический университет, [vitnov@inbox.ru](mailto:vitnov@inbox.ru)

## Information about the authors:

**I.Yu. Ivanov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazan State Power Engineering University, [igorivanov85@list.ru](mailto:igorivanov85@list.ru)

**V.V. Novokreshchenov** – Senior Lecturer, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, [vitnov@inbox.ru](mailto:vitnov@inbox.ru)

*Статья поступила в редакцию / the article was submitted 13.12.2023;*

*одобрена после рецензирования / approved after reviewing 17.03.2023;*

*принята к публикации / accepted for publication 28.03.2023.*