



DOI: 10.18721/JEST.240102  
УДК 621.311:621.316:621.317

*М.Г. Попов*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

## **ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА МЕЖСИСТЕМНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЗАРЯДНОЙ МОЩНОСТИ**

Исследованы динамические свойства продольной дифференциальной защиты линии электропередачи с компенсацией зарядной мощности, разработаны рекомендации по повышению чувствительности защиты. В результате исследований установлено, что для обеспечения селективной работы минимальный ток срабатывания защиты недопустим по условию чувствительности в режимах включения ВЛ на холостой ход. Следовательно, для достижения требуемых показателей чувствительности и быстродействия необходимо увеличение основного сигнала торможения. Представлены результаты оценки эффективности предложенных ранее способов повышения эффективности защиты. Использование дополнительного торможения за счет компенсации токов небаланса, обусловленных распределенной емкостью ВЛ, позволяет в значительной мере повысить чувствительность защиты. Наиболее эффективно применение дополнительного торможения в объеме 80–100 % при пониженном уровне ( $k_r = 0,1–0,2$ ) основного тормозного сигнала.

ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ; ТРАНСФОРМАТОР ТОКА; ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА; ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА; ТОРМОЗНОЙ СИГНАЛ; КОРРЕКЦИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ.

*Ссылка при цитировании:*

М.Г. Попов. Дифференциальная защита межсистемных линий электропередачи с компенсацией зарядной мощности // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 17–26. DOI: 10.18721/JEST.240102.

*M.G. Popov*

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

## **DIFFERENTIAL PROTECTION OF INTER-SYSTEM TRANSMISSION LINES WITH CHARGE CAPACITY COMPENSATION**

The goal of the article was to investigate the dynamic properties of longitudinal differential protection of power lines with charge capacity compensation and to develop recommendations for increasing the sensitivity of protection. As a result of the study, it was established that the minimum tripping current of the protection is inadmissible for providing selective operation due to the condition of sensitivity in idle switching modes of the OL. Therefore, an increase in the main braking signal is necessary in order to achieve the required sensitivity and speed. The article presents the results of an evaluation of the effectiveness of the methods proposed earlier in [1] for improving the efficiency of protection. The use of additional braking due to compensation of unbalance currents caused by distributed capacitance of the OL allows to significantly increase the sensitivity of protection.

ELECTRIC TRANSMISSION LINE; CURRENT TRANSFORMER; DYNAMIC PROPERTIES; DIFFERENTIAL PROTECTION; RESTRICTED SIGNAL; CORRECTION OF SENSITIVITY.

*Citation:*

M.G. Popov. Differential protection of inter-system transmission lines with charge capacity compensation, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 17–26, DOI: 10.18721/JEST.240102.

### Актуальность и постановка задачи исследований

Одна из основных защит воздушных линий (ВЛ) электропередачи – продольная токовая дифференциальная. Её микропроцессорные полуккомплекты устанавливаются на смежных подстанциях. Организация системы дифференциальной защиты (рис. 1) подразумевает использование коммуникационных интерфейсов для информационного обмена измеренными мгновенными значениями токов в фазах линий электропередачи (ЛЭП).

Несовершенство дифференциальных защит обусловлено в основном токами небаланса различной природы. Для ослабления их влияния в нестационарных режимах применяются сигналы торможения, которые пропорциональны фазным токам плеч дифференциальной защиты. Однако при внешних КЗ со значительной кратностью тормозной сигнал может быть существенно искажен (вплоть до полного его отсутствия) вследствие насыщения трансформаторов тока. Традиционное решение этой проблемы, применяемое всеми производителями – введение блокировки или глубокое торможение, что, в конечном счете, приводит к увеличению времени срабатывания и снижению чувствительности защиты. В связи с этим решение проблемы повышения чувствительности и быстродействия дифференциальной защиты линий чрезвычайно актуально.

Как уже отмечалось в [1], методика исследования нестационарных режимов измерительных цепей защиты основана на проведении численных экспериментов с цифровой записью (осциллографирование) переходных процессов линии электропередачи в наиболее характерных расчетных условиях. К ним прежде всего следует отнести режимы успешного и неуспешного опробования включения ЛЭП. При этом наибольшие амплитудные значения токов включения на холостой ход или короткое замыкание будут соответствовать нулевому углу напряжения коммутации.

С учетом изложенного целью статьи является исследование\* динамических свойств

\* Исследования проводились в рамках выполнения государственного задания по договору № 13.8886.2017/БЧ.

продольной дифференциальной защиты линии электропередачи с компенсацией зарядной мощности и разработка рекомендаций по повышению чувствительности защиты.

### Исследование нестационарных режимов ЛЭП с шунтирующими реакторами и ее системы дифференциальной защиты

Для проведения расчетных исследований была разработана математическая модель межсистемной линии электропередачи сверхвысокого напряжения 500 кВ с усовершенствованной структурой дифференциальной защиты (рис. 2).

Математическое описание и решение системы дифференциальных уравнений переходных процессов воздушной линии сверхвысокого напряжения с грозозащитными тросами достаточно подробно выполнено в [1, 8–10] и имеет матричную форму записи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dx} [U(t)]_m = [R]_m [I(t)]_m + \\ + [LM]_m \frac{d}{dt} [I(t)]_m; \\ \frac{d}{dx} [I(t)]_n = [G]_n [U(t)]_n + \\ + [CK]_n \frac{d}{dt} [U(t)]_n, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $x$  – расстояние относительно подстанции SS1, км;  $[U(t)]$ ,  $[I(t)]$  – столбцы-векторы мгновенных напряжений и токов многопроводной линии, соответственно, В и А;  $[R]_m$  – матрица удельных активных сопротивлений  $m$ -го участка ВЛ, Ом/км;  $[LM]_m$  – матрица удельных индуктивностей  $m$ -го участка ВЛ, Гн/км;  $[G]_n$  – матрица удельных активных проводимостей  $n$ -го узла ВЛ, См/км;  $[CK]_n$  – матрица удельных ёмкостей  $n$ -го узла ВЛ, Ф/км.

Анализ динамических свойств типовых структур микропроцессорных дифференциальных защит достаточно подробно выполнен в [5–7, 10]. Описание вспомогательных микропроцессорных модулей (см. Доп. МП РЗА на рис. 2) и алгоритма формирования корректирующего тормозного сигнала изложено в [1].

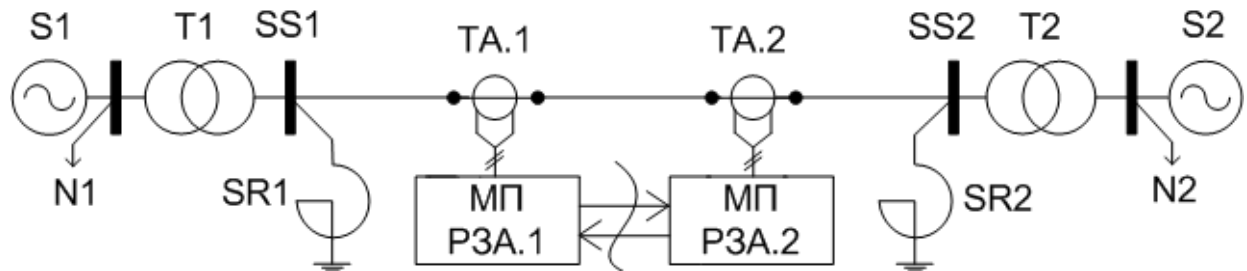


Рис. 1. Принципиальная схема подключения полукомплектов дифференциальной защиты воздушной линии с шунтирующими реакторами  
 Fig. 1. Principal diagram of overhead line with shunting reactors differential protection half-sets connection

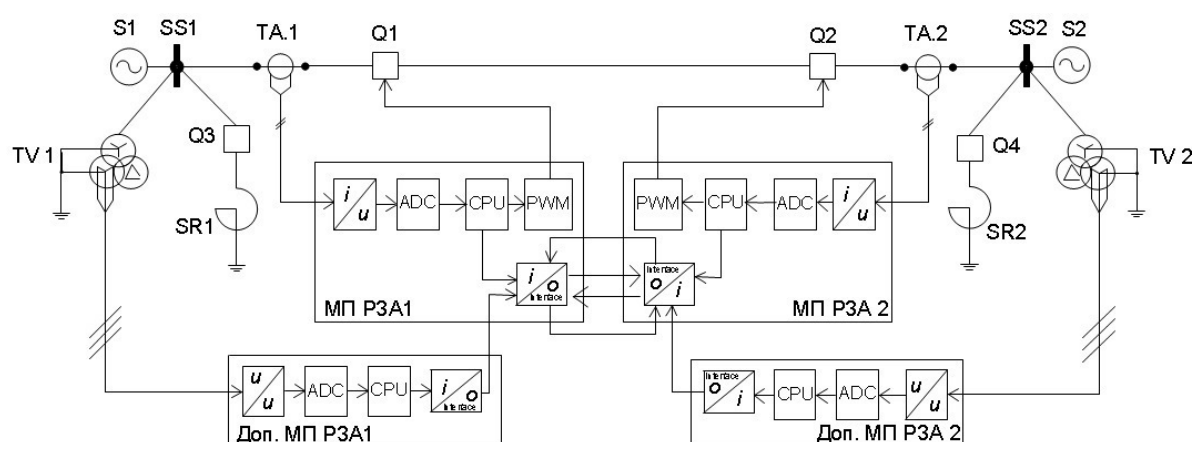


Рис. 2. Структурная схема микропроцессорной дифференциальной защиты воздушной ЛЭП с шунтирующими реакторами  
 Fig. 2. Structural diagram of microprocessor differential protection of overhead power supply line with shunting reactors

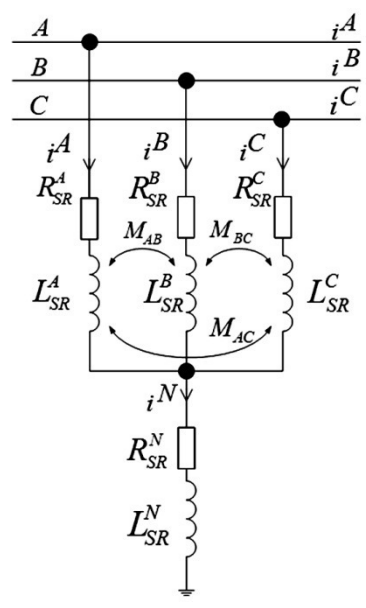


Рис. 3. Схема замещения ШР  
 Fig. 3. Diagram of shunting reactor

В свою очередь, подсистема уравнений переходных процессов в шунтирующих реакторах (ШР) (рис. 3) имеет вид

$$\begin{cases} u^A = (R_{SR}^A + R_{SR}^N) i^A + (L_{SR}^A + L_{SR}^N) \frac{di^A}{dt} + R_{SR}^N i^B + \\ + (M_{AB} + L_{SR}^N) \frac{di^B}{dt} + R_{SR}^N i^C + (M_{AC} + L_{SR}^N) \frac{di^C}{dt}; \\ u^B = (R_{SR}^B + R_{SR}^N) i^B + (L_{SR}^B + L_{SR}^N) \frac{di^B}{dt} + R_{SR}^N i^A + \\ + (M_{BA} + L_{SR}^N) \frac{di^A}{dt} + R_{SR}^N i^C + (M_{BC} + L_{SR}^N) \frac{di^C}{dt}; \\ u^C = (R_{SR}^C + R_{SR}^N) i^C + (L_{SR}^C + L_{SR}^N) \frac{di^C}{dt} + R_{SR}^N i^A + \\ + (M_{CA} + L_{SR}^N) \frac{di^A}{dt} + R_{SR}^N i^B + (M_{CB} + L_{SR}^N) \frac{di^B}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $R_{SR}^A$ ,  $R_{SR}^B$ ,  $R_{SR}^C$  – активные фазные сопротивления трехфазного шунтирующего реактора, Ом;  $R_{SR}^N$ ,  $L_{SR}^N$  – соответственно

активное сопротивление и индуктивность шунтирующего реактора, устанавливаемого в нейтрали, Ом и Гн;  $L_{SR}^A$ ,  $L_{SR}^B$ ,  $L_{SR}^C$  – фазные индуктивности трехфазного шунтирующего реактора, Гн;  $M_{AB}$ ,  $M_{BC}$ ,  $M_{CA}$  – соответствующие взаимные индуктивности трехфазного шунтирующего реактора, Гн.

При отсутствии реактора в нейтрали и однофазном исполнении линейных шунтирующих реакторов подсистема уравнений (2) преобразуется к виду

$$\begin{cases} u^A = R_{SR}^A i^A + L_{SR}^A \frac{di^A}{dt}; \\ u^B = R_{SR}^B i^B + L_{SR}^B \frac{di^B}{dt}; \\ u^C = R_{SR}^C i^C + L_{SR}^C \frac{di^C}{dt}. \end{cases} \quad (3)$$

Расчетные исследования переходных процессов линии электропередачи с шунтирующими реакторами и измерительных цепей её защиты выполнены применительно к следующим нестационарным режимам: включению на холостой ход со стороны подстанции SS1 (рис. 4–6, интервал времени  $t = 0,1–0,2$  с) и последующее короткое замыкание (рис. 7, 8, интервал времени  $t = 0,2–0,5$  с). Для оценки эффективности предлагаемого в [1] нового способа дополнительного торможения дифференциальной защиты производилось варьирование коэффициента торможения  $k_T$  от 0 до 1 и приведенного коэффициента компенсации ( $k_C = k_T k_{C_{\text{фазн}}}$ ).

**Анализ результатов исследований и разработка рекомендаций по повышению чувствительности и быстродействия защиты**

Расчетные осциллограммы переходных процессов в измерительных цепях защиты при неуспешном опробовании трехфазной линии электропередачи изображены на рис. 4–8. Из представленных на указанных рисунках расчетных осциллограмм нестационарных режимов измерительных органов защиты наиболее показательными являются дифференциальные токи поврежденных фаз в режиме КЗ на шинах противоположной подстанции и дифференциальный ток неповрежденной фазы С в режиме холостого хода (см. рис. 6, табл. 1).

Таблица 1

**Параметры срабатывания защиты фазы С при включении ВЛ**

Table 1

**The parameters of actuation of the protection for phase C of line switching**

$k_T$ , о.е.	$k_C$ , о.е.	$I_{c.з.}$ , о.е.	Примечания
0,1	$> 1$ ( $> 2$ )	0,1	рис. 6, а
	$\geq 0,8$ ( $> 1$ )	0,2	
	$\geq 0,5$ ( $\geq 0,85$ )	0,3	
	$\geq 0,15$ ( $\geq 0,8$ )	0,4	
	0	0,51 (0,7)	
0,2	$> 1$ ( $> 1,6$ )	0,1	рис. 6, б
	$\geq 0,64$ ( $> 1$ )	0,2	
	$\geq 0,4$ ( $\geq 0,9$ )	0,3	
	$\geq 0,1$ ( $\geq 0,6$ )	0,41	
	0	0,45 (0,63)	
0,5	$\geq 0,5$	0,1	рис. 6, в
	$\geq 0,21$	0,2	
	$\geq 0,08$	0,25	
	0	0,28 (0,39)	
	$-(\geq 0,3)$	0,3	

Примечание. В скобках указаны соответствующие параметры срабатывания защиты для ВЛ без поперечной компенсации.

Анализ представленных на рис. 4 расчетных осциллограмм показал, что для обеспечения селективной работы ДЗЛ необходима ее отстройка от тока включения 0,77 о.е. при отсутствии компенсации зарядной мощности (без ШР). Оснащение ВЛ с обеих сторон шунтирующими реакторами мощностью 180 МВА для компенсации емкостных токов позволяет несколько снизить минимальный ток срабатывания защиты до величины около 0,56 о.е. (см. рис. 4, фаза С при  $k_T = 0$ ). Однако это значение не удовлетворяет требованиям чувствительности, поскольку  $k_{\text{ч}} = 1,78$  о.е. (менее 2,0 о.е.). Приемлемым показателям чувствительности и быстродействия защиты ( $I_{c.з. \text{ min}} = 0,1–0,2$  о.е.) соответствует завышенный уровень основного торможения ( $k_T = 0,65–0,85$  о.е.).

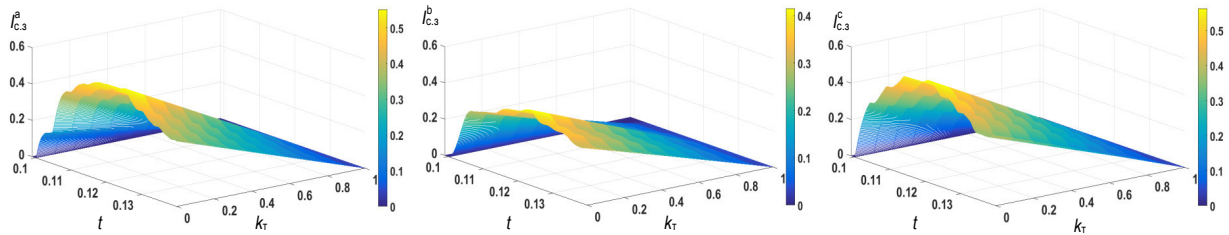


Рис. 4. Фазные токи срабатывания защиты при включении ВЛ на XX и наличии только основного торможения ( $k_T = 0-1$  о.е.,  $k_C = 0$ )

Fig. 4. Phase currents of protection actuation in case of line switching on under open-circuit conditions and presence only basic restriction ( $k_T = 0-1$  p.u.,  $k_C = 0$  p.u.)

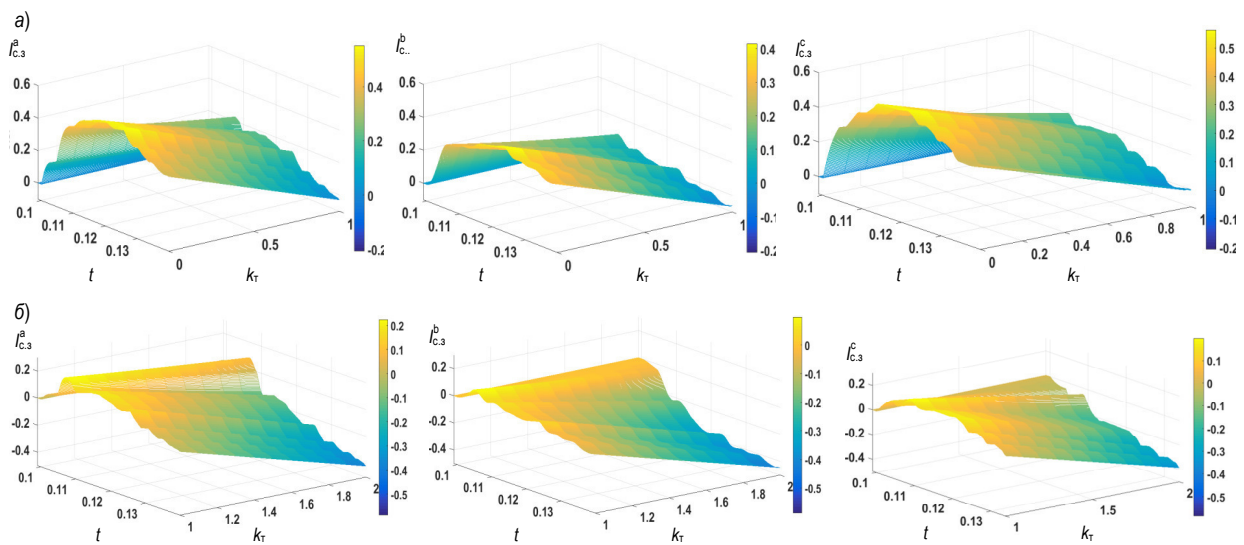


Рис. 5. Фазные токи срабатывания защиты при включении ВЛ на XX и наличии только дополнительного торможения ( $k_T = 0$ ): вариация дополнительного торможения в диапазоне  $k_C = 0-1$  о.е. (а) и вариация дополнительного торможения в диапазоне  $k_C = 1-2$  о.е. (б)

Fig. 5. Phase currents of protection actuation in case of line switching on under open-circuit conditions and only additional restriction ( $k_T = 0$ ): variable additional restriction  $k_C = 0-1$  p.u. (a) and variable additional restriction  $k_C = 1-2$  p.u. (b)

В случае некомпенсированной ВЛ (без ШР) указанные параметры селективной работы ДЗЛ еще хуже – требуется усиливать торможение защиты до 75–88 % ( $k_T = 0,75-0,88$  о.е.). Указанные уровни тормозных сигналов в обоих случаях недопустимы в условиях насыщения трансформаторов тока в одном из плеч дифференциальной защиты. В связи с этим введение коррекции тормозных сигналов по алгоритму, предложенному в [1], позволяет повысить быстродействие и чувствительность защиты.

С учетом сказанного далее изложены основные принципы выбора параметров срабатывания дифференциальной защиты, которые удовлетворяют требованиям ее селективности, чувствительности и быстродействия.

Использование дополнительных тормозных сигналов уровня 80–100 % (см. рис. 6, а, табл. 1,  $k_C = 0,8-1,0$  о.е.) позволяет достигнуть эффективных показателей чувствительности ( $I_{c.3 \min}^* = 0,2-0,24$  о.е.). Перекомпенсация на 90 % ( $k_C = 1,9$  о.е.) соответствует  $I_{c.3 \min} = 0,1$  о.е. Следует отметить, что для достижения коэффициента чувствительности  $k_{\text{ч}} = 10$  о.е. ( $I_{c.3 \min} = 0,1$  о.е.) в случае ДЗЛ без ШР перекомпенсация емкостных токов небаланса должна быть более 200 % ( $k_C > 2,5$  о.е.). Полная компенсация ( $k_C = 1$  о.е.) соответствует предельным значениям по чувствительности защиты:  $I_{c.3 \min} = 0,38$  о.е. ( $k_{\text{ч}} \approx 2,6$  о.е.).



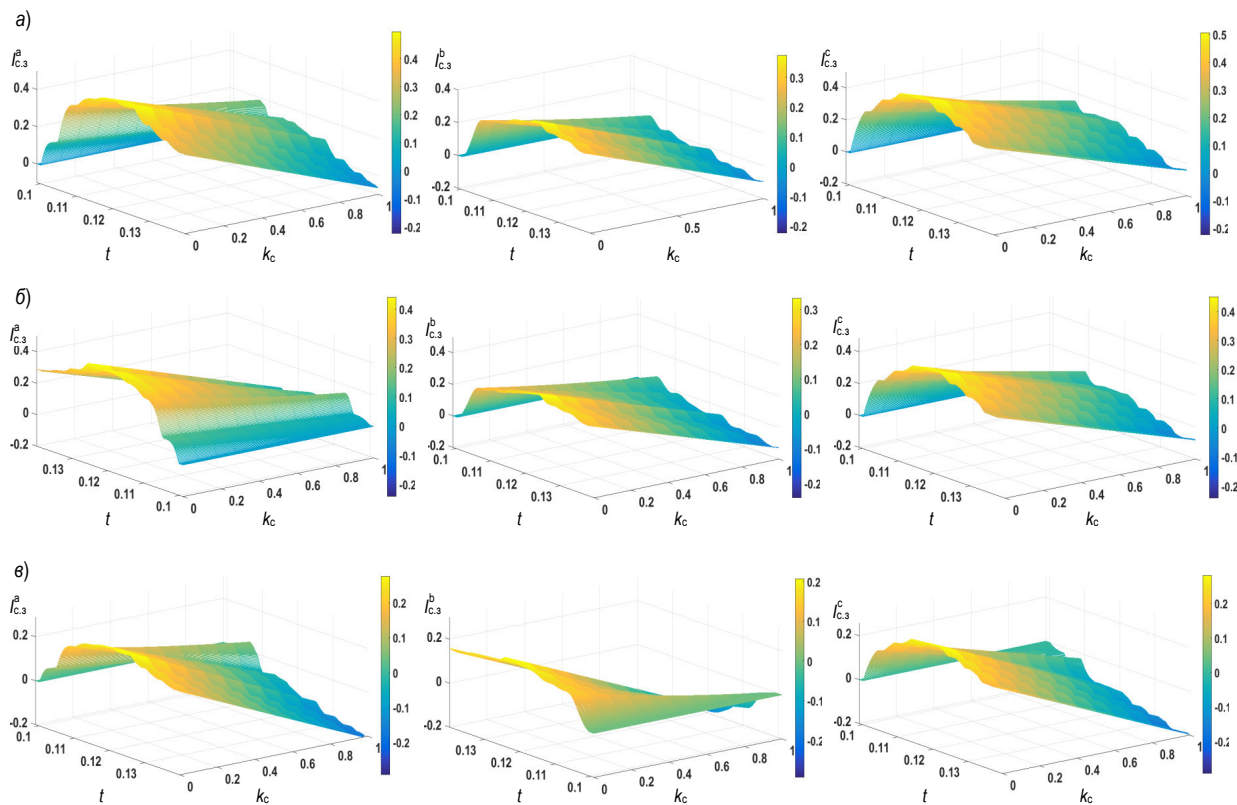


Рис. 6. Фазные токи срабатывания защиты при включении ВЛ на XX при наличии основного и вариации ( $k_c = 0-1$  о.е.) дополнительного торможения: уровень основного сигнала 10 (а), 20 (б) и 50 (е) % (соответственно  $k_T = 0,1; 0,2$  и  $0,5$  о.е.)

Fig. 6. Phase currents of protection actuation in case of line switching on under open-circuit conditions and presence basic and variable ( $k_c = 0-1$  p.u.) additional restriction: level basic restriction 10 (a), 20 (б) и 50 (е) ( $k_T = 0.1; 0.2$  and  $0.5$  p.u.)

Обобщая вышеизложенные результаты анализа динамических свойств ДЗЛ при включении (опробовании) ВЛ, необходимо подчеркнуть, что при выборе параметров срабатывания защиты требуется решить нетривиальную, многофакторную задачу с несколькими граничными условиями, характеризующими необходимые требования по селективности, чувствительности и быстродействию. Результатом этого решения являются области (диапазон) значений коэффициентов пропорциональности тормозных сигналов, формируемых по основному ( $k_T$ ) и дополнительному ( $k_C$ ) алгоритмам.

Обобщенная методика выбора коэффициентов торможения ( $k_T$ ) и компенсации включает в себя:

определение по расчетным осциллограммам включения ВЛ на XX коэффициентов  $k_T$  и  $k_C$  в окрестности требуемого по

условиям чувствительности диапазона срабатывания защиты (см. табл. 1);

проверку чувствительности и селективности работы защиты (см. табл. 2) в аварийных режимах «внутреннего КЗ» для наихудших условий (наименьший уровень токов).

Из совместного анализа данных табл. 1 и 2 следует, что для достижения приемлемых показателей чувствительности защиты (при  $I_{c3 \min} = 0,2$  о.е., см. табл. 1) коэффициент компенсации должен составлять не менее 0,8 о.е. ( $> 1$  о.е. без ШП) при малом ( $k_T = 0,1$  о.е.) тормозном сигнале. Указанный достаточно высокий уровень (80–100 %) дополнительного тормозного сигнала характеризуется отрицательными значениями дифференциального тока неповрежденной фазы С (см. рис. 8, б), а его положительной величине соответствуют относительно малые коэффициенты компенсации ( $k_C = 0-0,2$  о.е.) (см. табл. 2).

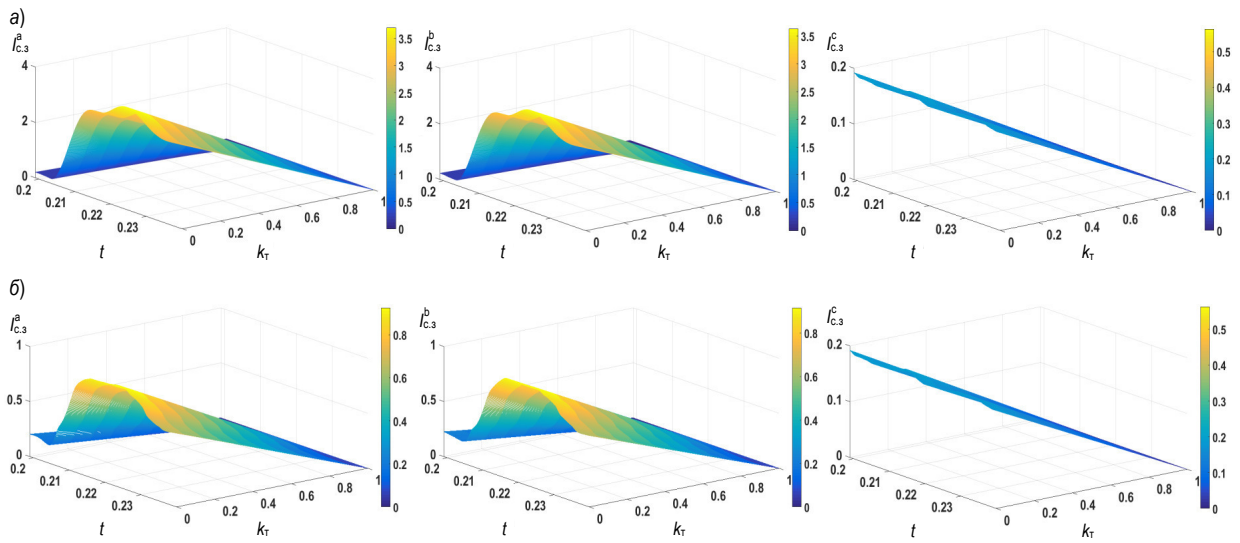


Рис. 7. Фазные токи срабатывания защиты в режиме междуфазного (AB) КЗ и наличии только основного торможения ( $k_T = 0-1$  о.е.,  $k_C = 0$  о.е.): повреждение на шинах подстанции SS1 (а) и SS2 (б)  
Fig. 7. Phase currents of protection actuation during phase-to-phase (AB) short circuit and with the presence of only basic restriction ( $k_T = 0-1$  p.u.,  $k_C = 0$  p.u.): short circuit on busbars of SS1 (a) and SS2 (b)

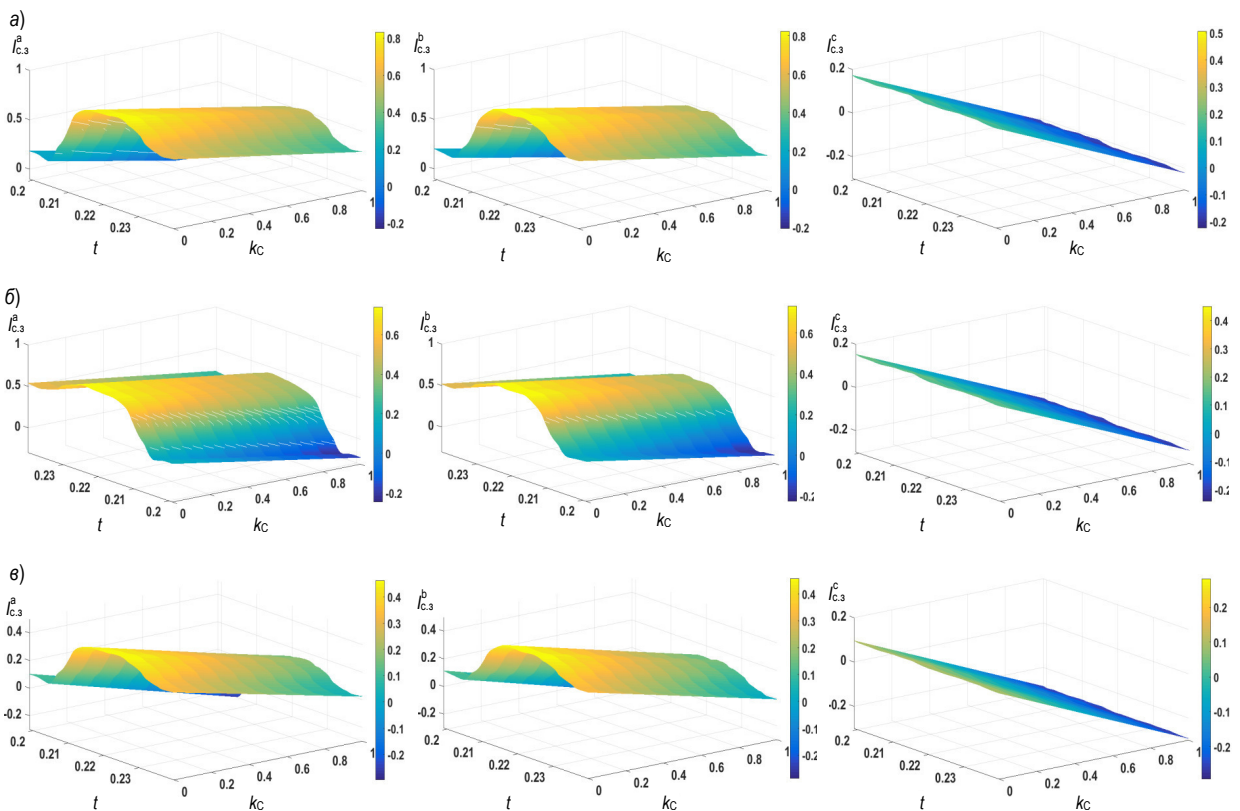


Рис. 8. Фазные токи срабатывания защиты в режиме междуфазного (AB) КЗ ВЛ вблизи подстанции SS2 при наличии основного и вариации ( $k_C = 0-1$  о.е.) дополнительного торможения: уровень основного тормозного сигнала 10 (а), 20 (б) и 50 (в) % (соответственно,  $k_T = 0,1; 0,2$  и  $0,5$  о.е.)  
Fig. 8. Phase currents of protection actuation during phase-to-phase (AB) short circuit near SS2 substation and with the presence of basic and variable ( $k_C = 0-1$  p.u.) additional restriction: level basic restriction 10 (a), 20 (b) and 50 (c) % ( $k_T = 0.1, 0.2$  and  $0.5$  p.u.)

Таблица 2  
Дифференциальный ток неповрежденной фазы С при двухфазном (АВ) КЗ вблизи шин ПС SS2

Table 2  
The differential current of the protection for phase C in case phase-to-phase (AB) short circuit near busbar of SS2 substation

$k_T$ , о.е.	$k_C$ , о.е.	$I_{c.3}$ , о.е.	Примечания
0,1	0,2 (0,82)	0,1	рис. 8, а
	0,065 (-)	0,15	
	0	0,18 (0,44)	
	-(0,57)	0,2	
0,2	0,15 (0,68)	0,1	рис. 8, б
	$\geq 0,02$	0,15	
	0	0,16 (0,39)	
	-(0,43)	0,2	
0,5	0	0,09 (0,24)	рис. 8, в
	-(0,33)	0,1	
	-(0,08)	0,2	

Примечание. В скобках указаны соответствующие параметры срабатывания защиты для ВЛ без поперечной компенсации.

Естественно, что усиление основного торможения ( $k_T = 0,2-0,5$  о.е., см. табл. 2) в режимах КЗ сопровождается необходимостью снижения уровня дополнительного сигнала торможения и, как уже отмечалось, невозможностью обеспечения селективной работы при включении (опробовании) ВЛ. При этом, аналогично рекомендациям, изложенным в [1], блокировка корректирующих тормозных сигналов не требуется.

С учетом вышеизложенного анализа результатов рекомендуется при введении дополнительного торможения в объеме 80–100 % снижать основной тормозной сигнал до уровня 10–20 % ( $k_T = 0,1-0,2$  о.е.). Дальнейшее совершенствование дифференциальной защиты с дополнительным торможением возможно при введении адаптивных (самонастраивающихся) алгоритмов компенсации.

Применение адаптивных тормозных сигналов в функции емкостных токов ( $k_C = var$ ) позволит достичь абсолютной чувствительности ДЗЛ с минимальным током срабатывания  $I_{c.3 min} \rightarrow 0$  и коэффици-

ентом торможения  $k_T \rightarrow 0$  при идеальном восстановлении (см. [2, 3]) первичных токов трансформаторов тока.

### Заключение

Выполнено исследование продольной дифференциальной защиты воздушной линии с шунтирующими реакторами. Показано, что при отсутствии дополнительного торможения ( $k_C = 0$  о.е.) рассчитанные по условиям селективности параметры срабатывания защиты не удовлетворяют нормативным требованиям ее чувствительности ( $I_{c.3 min}^* > 0,6$  о.с.,  $k_C < 2,0$  о.е.,  $k_T = 0,65-0,85$  о.е.), что говорит о малой эффективности основного алгоритма торможения. Отсутствие устройств компенсации зарядной мощности только усугубляет проблему эффективности применения основных тормозных сигналов ( $k_T = 0,75-0,88$  о.е.).

Применение коррекции тормозных сигналов в серийных полуккомплектах дифференциальной защиты позволяет в существенной мере улучшить чувствительность защиты ( $I_{c.3 min}^* = 0,2-0,24$  о.е.). Увеличением корректирующего сигнала торможения до 185 % можно добиться значительного повышения чувствительности защиты ( $k_C = 10,0$  о.е.).

Использование дополнительного торможения в объеме 80–100 % наиболее эффективно при пониженном уровне ( $k_T = 0,1-0,2$  о.е.) основного тормозного сигнала. Дальнейшее совершенствование дифференциальной защиты с коррекцией её характеристики срабатывания дополнительным торможением возможно при введении адаптивных (самонастраивающихся) алгоритмов дополнительного торможения.

Исследования проводились в рамках федеральной целевой программы «Совершенствование теории рабочих процессов производства, преобразования и транспорта энергии и разработка научных основ проектирования высокоэффективных теплосиловых установок, энергетических и транспортных машин, их систем и комплексов. № 13.8886.2017/БЧ».





## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абоу Накира Ш.С., Попов М.Г. Повышение эффективности продольной дифференциальной защиты воздушных линий электропередачи // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 1. С. 140–156. DOI: 10.18721/JEST.230114.
2. Ванин В.К., Попов М.Г., Попов С.О. Моделирование фильтров тока намагничивания и воспроизведения вторичных токов силовых трансформаторов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы X всероссийской научно-технической конференции. 2016. С. 268–269.
3. Vanin V., Popov M., Popov S. Increasing the Reliability of the Measuring Circuits of Protection Relays // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50. № 1. P. 87–92. Springer New York Consultants Bureau ISSN: 1570-145X, eISSN: 1570-1468.
4. Зарудский Г.К., Шипова И.А. Исследование пропускной способности воздушных линий компактного исполнения // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: материалы двадцать третьей международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. 2017. Т. 3. С. 327.
5. Sheskin E.V., Evdokunin G.A. Switching of high-voltage cable lines with shunt reactors. // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50. No 1. P. 108–114. Springer New York Consultants Bureau ISSN: 1570-145X, eISSN: 1570-1468.
6. Ванин В.К., Бахлуев В.А. Исследование погрешности работы фильтра тока намагничивания и воспроизведения вторичного тока силовых трансформаторов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем материалы XI Всероссийской научно-технической конференции. 2015. С. 339–340.
7. Ванин В.К., Бахлуев В.А. Фильтры тока намагничивания трансформаторов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 4(540). С. 59–62.
8. Glazyrin V.E., Litvinov I.I., Osintsev A.A. On methods of investigation of power generator differential protection behavior in automatic mode // Applied mechanics and materials ISSN: 1660-9336. 2015. Vol. 792. P. 237–242.
9. Куприенко В.В. Управление тормозным сигналом в дифференциальной защите // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сборник трудов восьмой международной научно-технической конференции / Отв. ред. Н.В. Савина. 2015. С. 421–423.
10. Левиуш А.И. Дифференциальная защита линий электропередач // Релейная защита и автоматизация. 2014. № 4. С. 30–34.
11. Кувшинов Г.Е., Соловьев Д.Б. Недостатки применения трансформаторов тока в дифференциальной токовой защите // Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. № 4. С. 23–29.
12. Ванин В.К., Мокеев А.В. Разработка алгоритмов обработки сигналов для многофункциональных устройств релейной защиты. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2006. № 5(47). Т 1. С. 93–98.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПОПОВ Максим Георгиевич** — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
E-mail: PopovMG@eef.spbstu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 07.11.2017

## REFERENCES

- [1] Abounakera S.X., Popov M.G. Improving the efficiency of differential protection of overhead transmission lines, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 23(01)(2017) 140–156. DOI: 10.18721/JEST.230114. (rus)
- [2] Vanin V.K., Popov M.G., Popov S.O. Modelirovaniye filtrov toka namagnichivaniya i vosproizvedeniye vtorichnykh tokov silovykh transformatorov. *Informatsionnyye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike: materialy X vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. 2016. S. 268–269. (rus)
- [3] Vanin V., Popov M., Popov S. Increasing the Reliability of the Measuring Circuits of Protection Relays. *Power Technology and Engineering*. 2016. Vol. 50. No 1. P. 87–92. Springer New York Consultants Bureau ISSN: 1570-145X, eISSN: 1570-1468.

- [4] **Zarudskiy G.K., Shipova I.A.** Issledovaniye propusknoy sposobnosti vozdushnykh liniy kompaktnogo ispolneniya. Radioelektronika, elektrotehnika i energetika. *Materialy dvadtsat tretyey mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov*. 2017. T. 3. S. 327. (rus)
- [5] **Sheskin E.B., Evdokunin G.A.** Switching of high-voltage cable lines with shunt reactors. *Power Technology and Engineering*. 2016. Vol. 50. No 1. P. 108–114. Springer New York Consultants Bureau ISSN: 1570-145X, eISSN: 1570-1468.
- [6] **Vanin V.K., Bakhluyev V.A.** Issledovaniye pogreshnosti raboty filtra toka namagnichivaniya i vosproizvedeniya vtorichnogo toka silovykh transformatorov. *Dinamika nelineynykh diskretnykh elektrotekhnicheskikh i elektronnykh system: materialy XI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. 2015. S. 339–340. (rus)
- [7] **Vanin V.K., Bakhluyev V.A.** Filtry toka namagnichivaniya transformatorov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. 2015. № 4 (540). S. 59–62. (rus)
- [8] **Glazyrin V.E., Litvinov I.I., Osintsev A.A.** On methods of investigation of power generator differential protection behavior in automatic mode. *Applied mechanics and materials* ISSN: 1660-9336. 2015. Vol. 792. P. 237–242.
- [9] **Kupriyenko V.V.** Upravleniye tormoznym signalom v differentsialnoy zashchite. *Energetika: upravleniye, kachestvo i effektivnost ispolzovaniya energoresursov*. *Sbornik trudov vosmoy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii / Otv. red. N.V. Savina*. 2015. S. 421–423. (rus)
- [10] **Leviush A.I.** Differentsialnaya zashchita liniy elektroperedach. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*. 2014. № 4. S. 30–34. (rus)
- [11] **Kuvshinov G.Ye., Solovyev D.B.** Nedostatki primeneniya transformatorov toka v differentsialnoy tokovoy zashchite. *Elektrotekhnicheskiye komplekisy i sistemy upravleniya*. 2012. № 4. S. 23–29. (rus)
- [12] **Vanin V.K., Mokeyev A.V.** Razrabotka algoritmov obrabotki signalov dlya mnogofunktsionalnykh ustroystv releynoy zashchity. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki*. 2006. № 5(47). T. 1. S. 93–98. (rus)

#### AUTHORS

**POPOV Maksim G.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*  
E-mail: PopovMG@eef.spbstu.ru

Received: 07.11.2017