

DOI: 10.18721/JEST.230114

УДК 621.311: 621.316: 621.317

Ш.С. Абоу Накира, М.Г. Попов

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Несовершенство дифференциальных защит связано с так называемым током небаланса защиты, обусловленным причинами различной природы. Для ослабления его влияния используется тормозной ток, формируемый по заданному разработчиком алгоритму. Наиболее эффективными из применяемых являются алгоритмы получения тормозного тока пропорционально вторичным токам трансформаторов тока, которые установлены в плечах защищаемого объекта. Недостаток подобных способов: в случае внешних КЗ при увеличении тока намагничивания трансформаторов тока тормозной сигнал значительно уменьшается, в то время как дифференциальный сигнал возрастает. Чтобы исключить ложное срабатывание это требует существенного снижения чувствительности защиты или ее блокировки, увеличения времени срабатывания защиты. В работе предлагается дополнительный алгоритм для повышения чувствительности защиты воздушной ЛЭП с помощью вычислительно-программного комплекса Simulink, основанный на контроле (вычислении) емкостных токов математической модели. Как показали результаты исследований, при отсутствии компенсации емкостного фазного тока ВЛ минимальный ток срабатывания защиты, необходимый для обеспечения селективной работы оказался выше нормы. Следовательно, для достижения требуемых чувствительности и быстродействия необходимо увеличение основного сигнала торможения. Использование дополнительного торможения за счет компенсации емкостных токов ВЛ позволяет в значительной мере повысить чувствительность защиты.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА; ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ; ТРАНСФОРМАТОР ТОКА; МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА; КОРРЕКЦИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ.

Ссылка при цитировании:

Абоу Накира Ш.С. Повышение эффективности продольной дифференциальной защиты воздушных линий электропередачи // Научно-технические ведомости СПбГПУ. № Том 23, № 1, 2017. С. 140–156. DOI: 10.18721/JEST.230114

S.X. Abounakera, M.G. Popov

IMPROVING THE EFFICIENCY OF DIFFERENTIAL PROTECTION OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES

When applied to protecting over head transmission lines, the differential protection may mal-operate due to unbalanced currents caused by electromagnetic saturation of the current transformers under transient conditions. Restrain methods are the most common used to mitigate the effect of these currents. The disadvantage of such methods is that the restrain signal for external fault is significantly reduced by increasing the magnetizing current of the current transformers, whereas the differential signal increases. This leads to a reduction of the sensitivity of protection or increase tripping time to prevent mal-operation. This paper proposes an additional algorithm based on control (calculation) of capacitive currents mathematical models by using MATLAB/Simulink. to improve the sensitivity of transmission lines differential protection. Simulation results on MATLAB/Simulink. Simulation Results show that the new algorithm that using capacitive compensation current signal has better sensitivity than other methods.

DIFFERENTIAL PROTECTION; OVERHEAD TRANSMISSION LINES; IMPROVING PROTECTION SENSITIVITY; EFFICIENCY IMPROVEMENT.

Citation:

S.X. Abounakera, Improving the efficiency of differential protection of overhead transmission lines, St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology, 23 (1) (2017) 140–156, DOI: 10.18721/JEST.230114

Целью статьи является исследование динамических свойств продольной дифференциальной защиты линии электропередачи с помощью вычислительно-программного комплекса Simulink и выработка рекомендаций по повышению чувствительности защиты.

Состояние проблемы и постановка задачи исследований

Продольная токовая дифференциальная защита воздушных линий (ВЛ) электропередачи относится к основным защитам. В ее современном исполнении полукомплекты микропроцессорной защиты (МП РЗА) должны быть установлены на границах с защищаемой ВЛ подстанциях. Классическая реализация алгоритмов МП РЗА основана на получении посредством коммуникационных интерфейсов измеренных в полукомплектах фазных токов.

Как уже отмечено, действие дифференциальной защиты основано на том, что в нормальных условиях полная сумма всех токов, протекающих в защищаемой зоне, равна нулю. Это предварительное условие верно только для первичных цепей и только в том случае, если токи, создаваемые емкостями линий, и токи намагничивания трансформаторов и реакторов пренебрежимо малы. Вторичные токи, регистрируемые в МП РЗА, имеют погрешности, обусловленные частотными характеристиками трансформаторов тока (ТТ) и входных цепей МП РЗА. Ошибки при передаче сигналов также могут способствовать появлению дополнительных погрешностей. Вследствие этого для обеспечения правильной работы ДЗЛ необходимо выполнить ее отстрой-

ку от тока небаланса, характеризующего описанные выше факторы.

В установленном режиме работы интегральные значения токов включения линии можно считать неизменными, постоянными; их величина определяется уровнем напряжения и емкостью линии.

Обобщенная постановка задачи исследования переходных процессов воздушной линии и динамических свойств математической модели ее дифференциальной защиты заключается в тщательном и всестороннем анализе различных схемно-режимных условий воздушной линии. Из всего многообразия режимов работы можно выделить наиболее характерные расчетные условия, позволяющие в полной мере оценить надежность, селективность и чувствительность защиты. К этим расчетным условиям относятся режимы включения на холостой ход, включения под нагрузку, а также различного вида внутренние и внешние («сквозные») короткие замыкания. С целью выявления достоверной работы дифференциальной защиты в наихудших условиях рассмотрены коммутации, отвечающие моменту прохождения фазного напряжения через 0 и характеризующиеся наибольшими амплитудами токов. Также в последующем выполнен анализ переходных процессов воздушной линии и работы дифференциальных защит при повторных коммутациях силового оборудования в режимах внезапного короткого замыкания и нагрузки после включения на холостой ход. Кроме того, для выявления возможных ложных срабатываний проварьированы схемы организации питания воздушной линии.

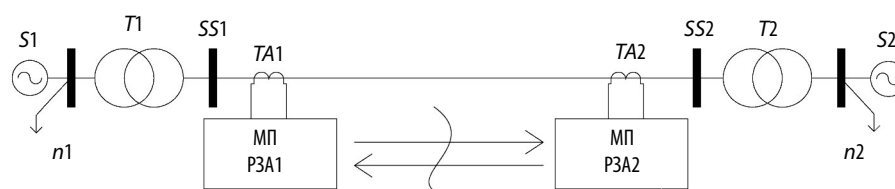


Рис. 1. Принципиальная схема подключения полукомплектов дифференциальной защиты воздушной линии

Отрицательная сторона применения данного способа: методика выбора параметров срабатывания защиты основана на вероятностной оценке тока небаланса в зависимости от величины тока плеч (чем больше токи плеч защиты, тем выше вероятность увеличения тока небаланса). Это обуславливает ряд трудностей при выборе коэффициентов торможения. В частности возникает необходимость либо проведения различных дополнительных испытаний при наладке защиты, либо наличия достаточно большого опыта эксплуатации на схожих объектах защиты. Тем не менее есть ряд дополнительных способов, увеличивающих быстродействие и чувствительность защиты. Они основаны на вычислении токов намагничивания измерительных трансформаторов тока, используют численные методы контроля погрешности измерительного тракта защиты и предназначены для дополнительного торможения. Это, в свою очередь, еще более усложняет выбор параметров срабатывания защиты и в большинстве случаев приводит к необходимости их адаптации при изменении параметров энергосистемы, например аperiодической постоянной первичной электрической цепи.

Математическое описание переходных процессов ВЛ и средств РЗА

Для решения поставленной задачи требуется создать математическую модель воздушной линии. В качестве примера рассмотрена межсистемная электропередача сверхвысокого напряжения (СВН) класса 500 кВ, схема которой представлена на рис. 2.

Математическая модель воздушной линии СВН с двумя грозозащитными тросами описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$-\frac{\partial}{\partial x} u_k(x, t) = r_k i_k(x, t) + L_k \frac{\partial}{\partial t} i_k(x, t) + \sum_{m=1}^{n-1} M_{km} \frac{\partial}{\partial t} i_m(x, t); \quad (1)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} i_k(x, t) = g_k u_k(x, t) + \sum_{m=1}^{n-1} g_{km} u_{km}(x, t) + C_k \frac{\partial}{\partial t} u_k(x, t) + \sum_{m=1}^{n-1} K_{km} \frac{\partial}{\partial t} u_{km}(x, t), \quad (2)$$

где k — номер рассматриваемого провода; r_k, L_k, g_k, C_k — собственные погонные электрические параметры k -го провода на единицу длины ВЛ; g_{km}, M_{km}, K_{km} — взаимные погонные электрические параметры между проводами k и m ВЛ; n — число проводов многопроводной ЛЭП.

Значения взаимных активных проводимостей между проводами и тросами линии настолько малы, что при дальнейших преобразованиях уравнения (2) будет принято $g_{km} = 0$.

Исследуемая в работе линия электропередачи имеет три фазных провода и два грозозащитных троса. На основании уравнений (1) и (2) составим подсистемы уравнений (3) и (4), описывающие распределение токов и напряжений в данной ЛЭП.

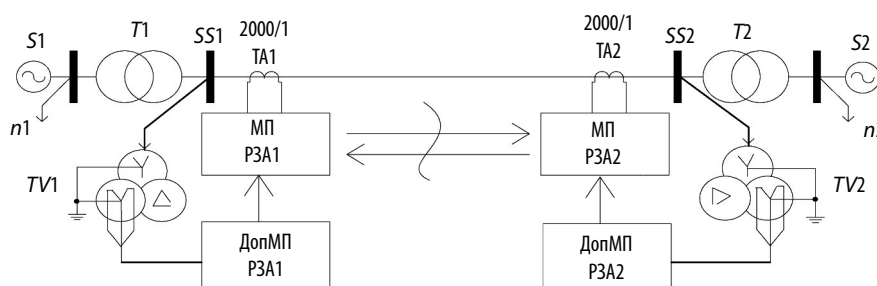


Рис. 2. Схема межсистемной электропередачи 500 кВ и ее дифференциальной защиты:

$S1$ и $S2$ — электрические системы; $n1$ и $n2$ — комплексные нагрузки; МП РЗА.1, МП РЗА.2 — микропроцессорные устройства релейной защиты; ДопМП РЗА 1, ДопМП РЗА 2 — дополнительные микропроцессорные устройства релейной защиты

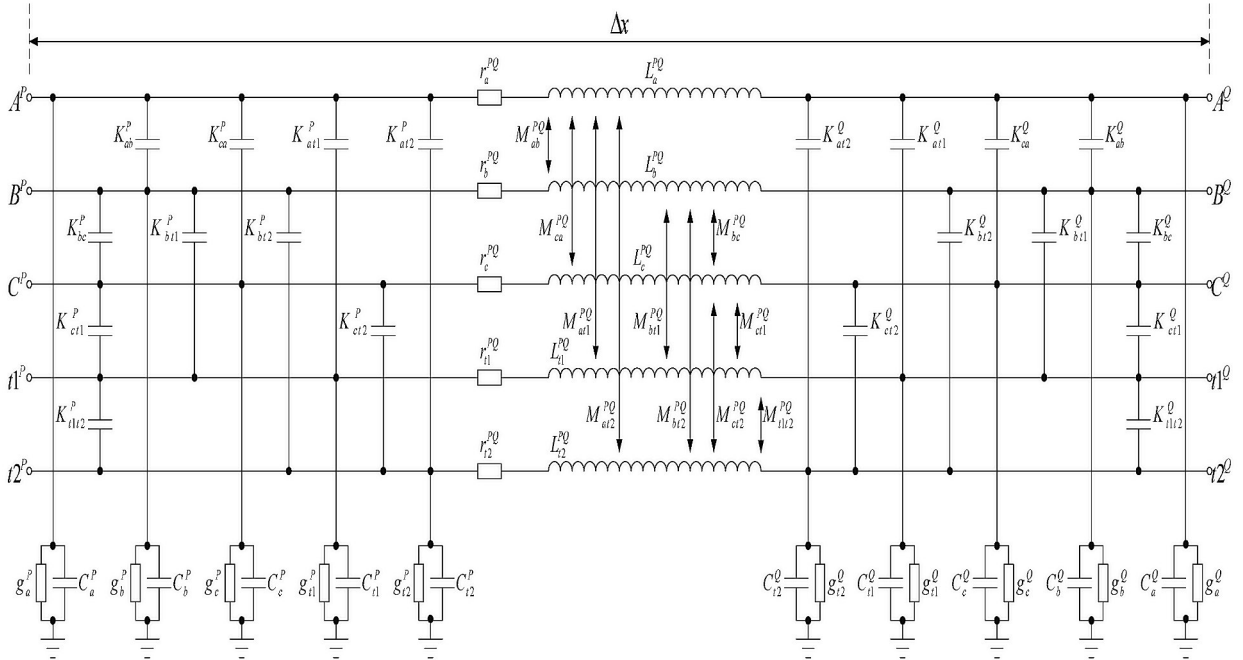


Рис. 3. Расчетная схема однородного участка ЛЭП между узлами P и Q

$$\left. \begin{aligned}
 -\frac{\partial u_a(x, t)}{\partial x} &= r_a i_a(x, t) + L_a \frac{\partial i_a(x, t)}{\partial t} + M_{ab} \frac{\partial i_b(x, t)}{\partial t} + M_{ac} \frac{\partial i_c(x, t)}{\partial t} + M_{a1} \frac{\partial i_{11}(x, t)}{\partial t} + M_{a12} \frac{\partial i_{12}(x, t)}{\partial t}; \\
 -\frac{\partial u_b(x, t)}{\partial x} &= r_b i_b(x, t) + M_{ba} \frac{\partial i_a(x, t)}{\partial t} + L_b \frac{\partial i_b(x, t)}{\partial t} + M_{bc} \frac{\partial i_c(x, t)}{\partial t} + M_{b1} \frac{\partial i_{11}(x, t)}{\partial t} + M_{b12} \frac{\partial i_{12}(x, t)}{\partial t}; \\
 -\frac{\partial u_c(x, t)}{\partial x} &= r_c i_c(x, t) + M_{ca} \frac{\partial i_a(x, t)}{\partial t} + M_{cb} \frac{\partial i_b(x, t)}{\partial t} + L_c \frac{\partial i_c(x, t)}{\partial t} + M_{c1} \frac{\partial i_{11}(x, t)}{\partial t} + M_{c12} \frac{\partial i_{12}(x, t)}{\partial t}; \\
 -\frac{\partial u_{11}(x, t)}{\partial x} &= r_{11} i_{11}(x, t) + M_{11a} \frac{\partial i_a(x, t)}{\partial t} + M_{11b} \frac{\partial i_b(x, t)}{\partial t} + M_{11c} \frac{\partial i_c(x, t)}{\partial t} + L_{11} \frac{\partial i_{11}(x, t)}{\partial t} + M_{1112} \frac{\partial i_{12}(x, t)}{\partial t}; \\
 -\frac{\partial u_{12}(x, t)}{\partial x} &= r_{12} i_{12}(x, t) + M_{12a} \frac{\partial i_a(x, t)}{\partial t} + M_{12b} \frac{\partial i_b(x, t)}{\partial t} + M_{12c} \frac{\partial i_c(x, t)}{\partial t} + M_{1211} \frac{\partial i_{11}(x, t)}{\partial t} + L_{12} \frac{\partial i_{12}(x, t)}{\partial t}
 \end{aligned} \right\} (3)$$

$$\left. \begin{aligned}
 -\frac{\partial i_a(x, t)}{\partial x} &= g_a u_a(x, t) + C_a \frac{\partial u_a(x, t)}{\partial t} + K_{ab} \frac{\partial u_{ab}(x, t)}{\partial t} + K_{ac} \frac{\partial u_{ac}(x, t)}{\partial t} + K_{a1} \frac{\partial u_{a1}(x, t)}{\partial t} + K_{a12} \frac{\partial u_{a12}(x, t)}{\partial t}; \\
 -\frac{\partial i_b(x, t)}{\partial x} &= g_b u_b(x, t) + K_{ba} \frac{\partial u_{ba}(x, t)}{\partial t} + C_b \frac{\partial u_b(x, t)}{\partial t} + K_{bc} \frac{\partial u_{bc}(x, t)}{\partial t} + K_{b1} \frac{\partial u_{b1}(x, t)}{\partial t} + K_{b12} \frac{\partial u_{b12}(x, t)}{\partial t}; \\
 -\frac{\partial i_c(x, t)}{\partial x} &= g_c u_c(x, t) + K_{ca} \frac{\partial u_{ca}(x, t)}{\partial t} + K_{cb} \frac{\partial u_{cb}(x, t)}{\partial t} + C_c \frac{\partial u_c(x, t)}{\partial t} + K_{c1} \frac{\partial u_{c1}(x, t)}{\partial t} + K_{c12} \frac{\partial u_{c12}(x, t)}{\partial t}; \\
 -\frac{\partial i_{11}(x, t)}{\partial x} &= g_{11} u_{11}(x, t) + K_{11a} \frac{\partial u_{11a}(x, t)}{\partial t} + K_{11b} \frac{\partial u_{11b}(x, t)}{\partial t} + K_{11c} \frac{\partial u_{11c}(x, t)}{\partial t} + C_{11} \frac{\partial u_{11}(x, t)}{\partial t} + K_{1112} \frac{\partial u_{1112}(x, t)}{\partial t}; \\
 -\frac{\partial i_{12}(x, t)}{\partial x} &= g_{12} u_{12}(x, t) + K_{12a} \frac{\partial u_{12a}(x, t)}{\partial t} + K_{12b} \frac{\partial u_{12b}(x, t)}{\partial t} + K_{12c} \frac{\partial u_{12c}(x, t)}{\partial t} + K_{1211} \frac{\partial u_{1211}(x, t)}{\partial t} + C_{12} \frac{\partial u_{12}(x, t)}{\partial t}
 \end{aligned} \right\} (4)$$

Уравнения переходных процессов эквивалентных источников (электрических систем) $S1$ и $S2$:

$$\begin{cases} e_{s1}^a(t) = R_{s1}i_{s1}^a(t) + L_{s1}\frac{\partial}{\partial t}i_{s1}^a(t) + u_a(0, t); \\ e_{s1}^b(t) = R_{s1}i_{s1}^b(t) + L_{s1}\frac{\partial}{\partial t}i_{s1}^b(t) + u_b(0, t); \\ e_{s1}^c(t) = R_{s1}i_{s1}^c(t) + L_{s1}\frac{\partial}{\partial t}i_{s1}^c(t) + u_c(0, t); \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} e_{s2}^a(t) = R_{s2}i_{s2}^a(t) + L_{s2}\frac{\partial}{\partial t}i_{s2}^a(t) + u_a(X, t); \\ e_{s2}^b(t) = R_{s2}i_{s2}^b(t) + L_{s2}\frac{\partial}{\partial t}i_{s2}^b(t) + u_b(X, t); \\ e_{s2}^c(t) = R_{s2}i_{s2}^c(t) + L_{s2}\frac{\partial}{\partial t}i_{s2}^c(t) + u_c(X, t); \end{cases} \quad (6)$$

где $e_{s1}(t), e_{s2}(t)$ — трехфазные ЭДС электрических систем $S1$ и $S2$; $R_{s1}(t), R_{s2}(t)$ — активные сопротивления ЭС $S1$ и $S2$; $L_{s1}(t), L_{s2}(t)$ — индуктивности ЭС $S1$ и $S2$; $u(0, t)$ — фазное напряжение в начале линии электропередачи при $x = 0$ км; $u(X, t)$ — фазное напряжение в конце линии электропередачи.

Запишем системы дифференциальных уравнений электрических нагрузок $n1$ и $n2$:

$$\begin{cases} 0 = R_{n1}i_{n1}^a(t) + L_{n1}\frac{\partial}{\partial t}i_{n1}^a(t) - u_a(0, t); \\ 0 = R_{n1}i_{n1}^b(t) + L_{n1}\frac{\partial}{\partial t}i_{n1}^b(t) - u_b(0, t); \\ 0 = R_{n1}i_{n1}^c(t) + L_{n1}\frac{\partial}{\partial t}i_{n1}^c(t) - u_c(0, t); \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} 0 = R_{n2}i_{n2}^a(t) + L_{n2}\frac{\partial}{\partial t}i_{n2}^a(t) - u_a(X, t); \\ 0 = R_{n2}i_{n2}^b(t) + L_{n2}\frac{\partial}{\partial t}i_{n2}^b(t) - u_b(X, t); \\ 0 = R_{n2}i_{n2}^c(t) + L_{n2}\frac{\partial}{\partial t}i_{n2}^c(t) - u_c(X, t); \end{cases} \quad (8)$$

где $R_{n1}(t), R_{n2}(t)$ — активные сопротивления нагрузок $n1$ и $n2$; $L_{n1}(t), L_{n2}(t)$ — индуктивности нагрузок $n1$ и $n2$.

Используя выражение

$$K_{km} \frac{\partial u_{km}(x, t)}{\partial t} = K_{km} \frac{\partial (u_k(x, t) - u_m(x, t))}{\partial t} =$$

$$= K_{km} \frac{\partial u_k(x, t)}{\partial t} - K_{km} \frac{\partial u_m(x, t)}{\partial t}, \quad (9)$$

Введем в систему уравнений (4) фазные величины напряжений и запишем системы (3)–(8) в матричном виде:

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x}[U(x, t)] = [R][I(x, t)] + [LM]\frac{\partial}{\partial t}[I(x, t)]; \\ -\frac{\partial}{\partial x}[I(x, t)] = [G][U(x, t)] + [CK]\frac{\partial}{\partial t}[U(x, t)]; \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} [e_{s1}(t)] = \\ = [R_{s1}][I_{s1}(t)] + [L_{s1}]\frac{\partial}{\partial t}[I_{s1}(t)] + [U(0, t)]; \\ [e_{s2}(t)] = \\ = [R_{s2}][I_{s2}(t)] + [L_{s2}]\frac{\partial}{\partial t}[I_{s2}(t)] + [U(X, t)]; \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} [0] = [R_{n1}][I_{n1}(t)] + [L_{n1}]\frac{\partial}{\partial t}[I_{n1}(t)] - [U(0, t)]; \\ [0] = [R_{n2}][I_{n2}(t)] + [L_{n2}]\frac{\partial}{\partial t}[I_{n2}(t)] - [U(X, t)]. \end{cases} \quad (12)$$

Совместное решение систем уравнений (10)–(12) осуществляется с использованием многошаговых численных методов интегрирования жестких систем дифференциальных уравнений. Для этого преобразуем систему (10), используя выражения

$$\frac{\partial}{\partial x}u(x, t) = \frac{u_n(t) - u_{n-1}(t)}{\Delta x}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}i(x, t) = \frac{i_{m+1}(t) - i_m(t)}{\Delta x}, \quad (14)$$

где Δx — шаг дискретизации; n, m — индексы.

Тогда (10) принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{[U(t)]_n - [U(t)]_{n-1}}{\Delta x} = \\ = [R]_m [I(t)]_m + [LM]_m \frac{\partial}{\partial t} [I(t)]_m; \\ \frac{[I(t)]_{m+1} - [I(t)]_m}{\Delta x} = \\ = [G]_n [U(t)]_n + [CK]_n \frac{\partial}{\partial t} [U(t)]_n. \end{cases} \quad (15)$$

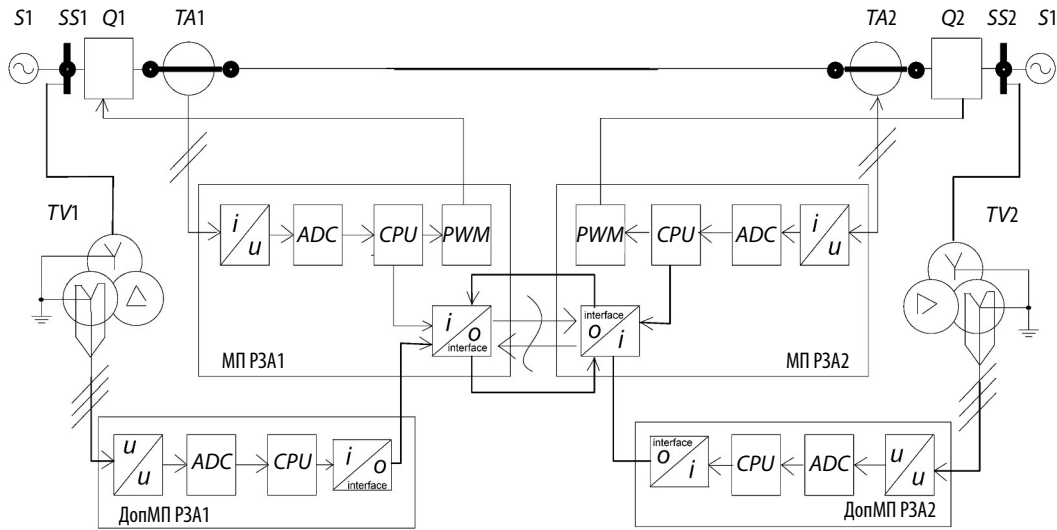


Рис. 4. Структурная схема микропроцессорной дифференциальной защиты воздушной ЛЭП

На рис. 4 представлена усовершенствованная структура дифференциальной защиты ВЛ. К основным серийно выпускаемым полукomплектам ДЗЛ (МПРЗА 1, 2) посредством коммуникационных интерфейсов (I/O) подключаются вспомогательные микропроцессорные модули (ДопМП РЗА), в контроллерах (CPU) которых реализован программный алгоритм дополнительного торможения. Измерительные цепи вспомогательных модулей включают первичные (ТА 1, 2 и TV1, 2) и вторичные (i/u ; u/u) преобразователи электрических сигналов тока и напряжения, а также аналогово-цифровые преобразователи (ADC). При этом значения фазных токов измеряются в основных полукomплектах, а затем передаются во вспомогательные модули по каналам (I/O) информационного обмена.

Одним из способов совершенствования дифференциальной защиты, исключающим указанные выше недостатки, является применение дополнительных алгоритмов, основанных на контроле (вычислении) емкостных токов математической модели воздушной линии электропередачи.

Мгновенное значение зарядного фазного тока вычисляется как произведение фазного напряжения и емкостной проводимости линии

$$i_c(t) = u(t)(2\pi f_0)C, \quad (16)$$

а его интегральное значение определяется выражением

$$I_c = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{\Phi}{2}}^{t+\frac{\Phi}{2}} i_c^2(t) dt}, \quad (17)$$

где f_0 — синхронная частота сети, равная 50 Гц; C — емкость фазы ВЛ относительно земли, Φ .

Величина тока срабатывания защиты определяется с учетом дополнительного сигнала торможения ($I_{\text{доп.торм}}$):

$$I_{c3} = I_{\text{диф}} - K_{\text{торм}} (I_{\text{торм}} + I_{\text{доп.торм}}), \quad (18)$$

где $I_{\text{диф}}$ — дифференциальный сигнал фазного тока, А; $I_{\text{торм}}$ — основной сигнал тормозной сигнал фазного тока, А; $K_{\text{торм}}$ — коэффициент торможения защиты, о. е.

Дополнительное торможение защиты производится сигналом, пропорциональным вычисленному емкостному фазному току математической модели линии:

$$I_{\text{доп.торм}} = K_{c\text{фазн}} I_c, \quad (19)$$

где K_c — коэффициент компенсации емкостного фазного тока ВЛ, о. е.

Кроме того, для повышения надежности дополнительного торможения при обрыве каналов связи во вспомогательном модуле (рис. 4, модель ДопМП РЗА) также вычисляется емкостной ток модели линии по выражениям

(1)–(15) относительно фазных напряжений на шинах противоположной подстанции.

Оценка эффективности предлагаемого нового способа дополнительного торможения выполняется в ходе анализа переходных процессов воздушной линии электропередачи и измерительных цепей ее защиты в следующих расчетных режимах: включение на холостой ход (рис. 5–10, расчетный интервал $t = 0,1–0,2$) и последующие однофазное или междуфазные короткие замыкания (рис. 11–14, расчетный интервал $t = 0,2–0,5$). Для указанных расчетных условий производилась вариация от 0 до 1 (с шагом 0,1) коэффициента торможения K_T и приведенного коэффициента компенсации, определяемого согласно выражению $K_C = K_{\text{торм}} K_{\text{с,фазн.}}$.

Характеристики изменения приведенных к номинальному первичному току трансформаторов тока ($I_{\text{ИТ,ном}} = 2000 \text{ А}$) фазных токов срабатывания защиты при включении на холостой ход и последующем двухфазном (AB) коротком замыкании на шинах подстанций представлены на рис. 5–14.

Необходимо отметить, что из всех представленных результатов наиболее характерными с точки зрения определения чувствительности и селективности защиты являются характеристики изменения тока фазы C при включении ВЛ на холостой ход, а также расчетные осциллограммы токов поврежденных фаз (A и B) при двухфазном коротком замыкании вблизи шин подстанции $SS2$. В связи с этим ниже приведен сопоставительный анализ выбора минимального тока срабатывания, а также коэффициентов компенсации и торможения, требуемых предельными условиями эффективности торможения ($K_T \leq 0,5$) и достаточными условиями чувствительности ($I_{\text{сз,мин}}^* = 0,1–0,2 \text{ о. е.}$).

Анализ представленных на рис. 5 расчетных осциллограмм показал, что при отсутствии компенсации емкостного фазного тока ($K_C = 0$) ВЛ для обеспечения селективной работы минимальный ток срабатывания защиты должен составлять более 0,562 (см. рис. 5, фаза C при $K_T = 0$). Достижение приемлемых (по условиям чувствительности и быстродействия) значений минимального тока срабатывания защиты $I_{\text{сз,мин}} = 0,1–0,2$ возможно при снятии блокировки торможения защиты и одновременно

с этим увеличения основного сигнала торможения до 65–85 % ($K_T = 0,65–0,85$). Такие значения коэффициентов торможения не допустимы по условиям эффективности основного способа торможения (полусумма токов плеч по модулю). Альтернативным мероприятием, позволяющим снизить величину минимального тока срабатывания защиты, служит введение дополнительного торможения защиты при сохранении ее стандартной логики работы — блокировке основных алгоритмов торможения при рабочем токе менее величины $I_{\text{сз,мин}}$. Использование дополнительного торможения в функции степени компенсации емкостных токов ВЛ позволяет в значительной мере повысить чувствительность защиты (см. рис. 6–10). В частности, для достижения раннее указанных приемлемых условий чувствительности и быстродействия ($I_{\text{сз,мин}}^* = 0,2–0,25 \text{ о. е.}$) степень компенсации (дополнительного торможения) должна составлять 80–115 % ($K_C = 0,8–1,15 \text{ о. е.}$). Перекомпенсация на 90 % ($K_C = 1,9$) соответствует $I_{\text{сз,мин}} = 0,1 \text{ о. е.}$

В свою очередь, при отсутствии компенсации ($K_C = 0$) эффективному сигналу основного торможения ($K_T \leq 0,5$) по условиям чувствительности и селективности защиты при двухфазном КЗ на шинах подстанции $SS2$ (см. рис. 8, б; фазы A и B) соответствует величина минимального тока срабатывания защиты $I_{\text{сз,мин}}^* \geq 5,5$. Следует также отметить, что при введении (разблокировке) основного алгоритма торможения блокировка сигнала дополнительного торможения даже при $K_C = 1$ не обязательна, поскольку в несущественной мере снижает чувствительность защиты при двухфазных ($A B$) КЗ вблизи шин подстанций $SS2$. Для достижения идентичных показателей чувствительности требуется незначительное увеличение сигнала основного торможения: $\Delta K_T = 0,5–1 \%$ (0,005–0,01 о. е.).

Заключение

В среде визуального программирования выполнено исследование продольной дифференциальной защиты воздушной линии с применением разработанной математической модели высоковольтной линии электропередачи и ее продольной токовой дифференциальной защиты.

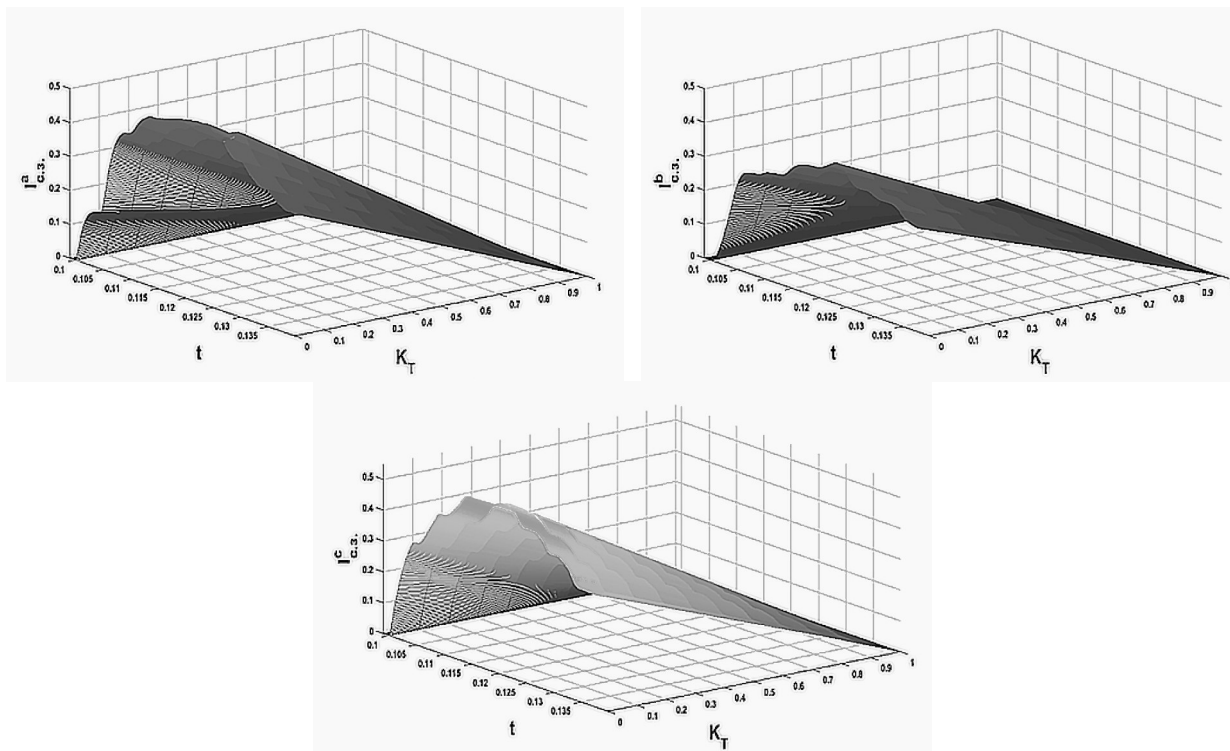


Рис. 5. Фазные токи срабатывания защиты при включении ВЛ на XX и наличии только основного торможения ($K_T = 0-1$, $K_C = 0$)

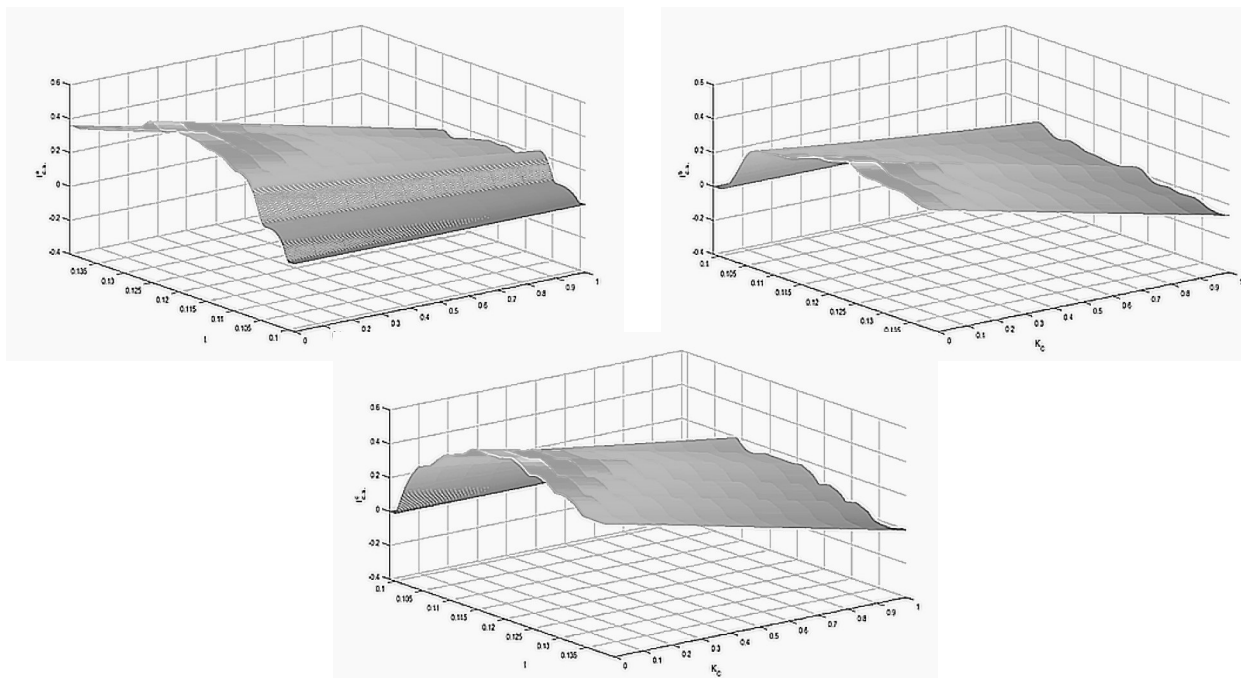


Рис. 6. Фазные токи срабатывания защиты при включении ВЛ на XX и наличии только дополнительного торможения ($K_T = 0$, $K_C = 0-1$)

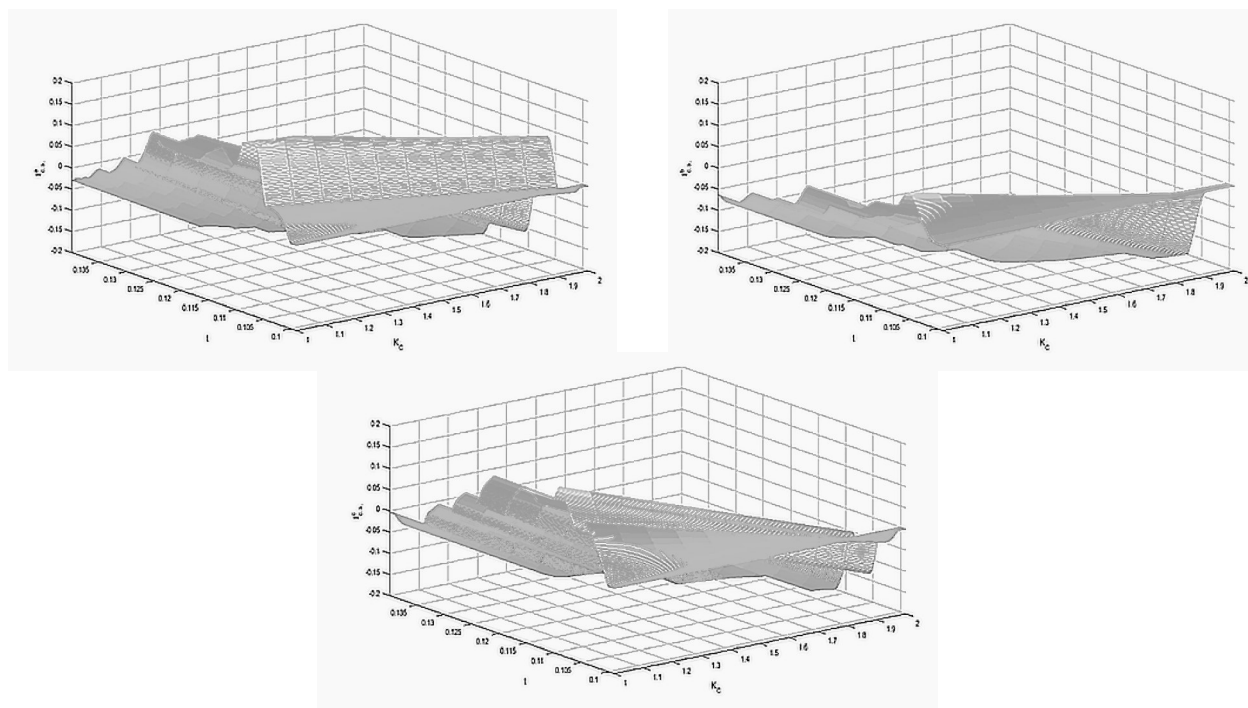


Рис. 7. Фазные токи срабатывания защиты при включении ВЛ на XX и наличии только дополнительного торможения ($K_T = 0$, $K_c = 1-2$)

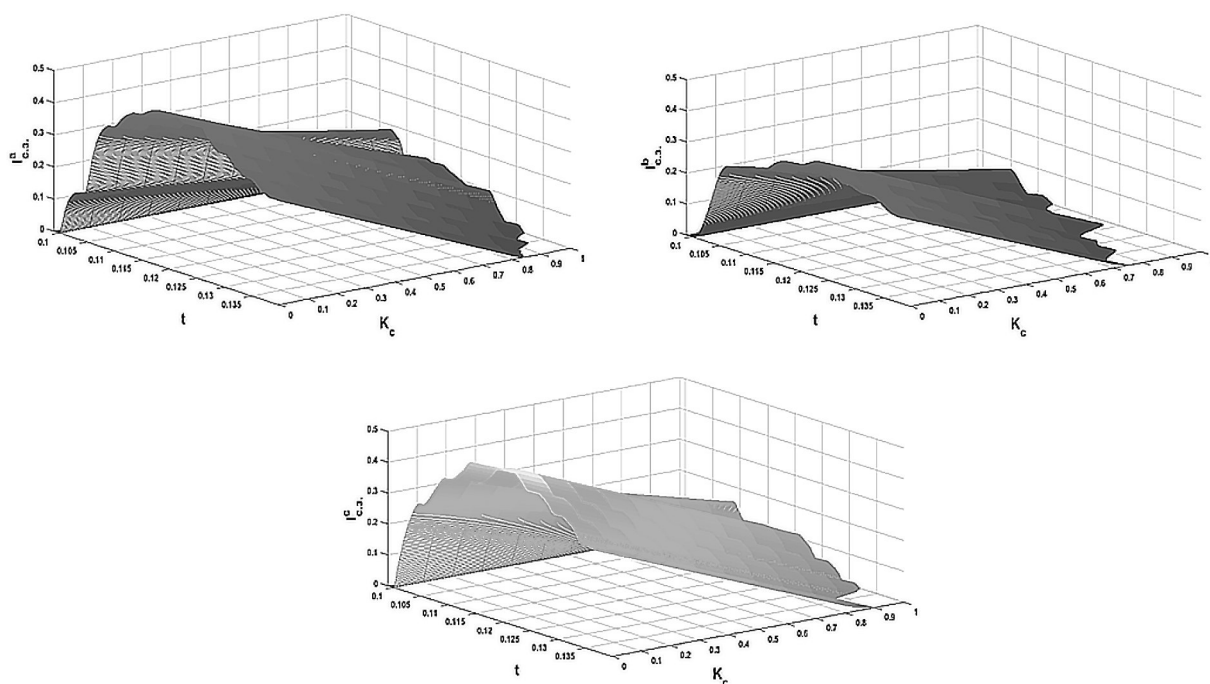


Рис. 8. Фазные токи срабатывания защиты при включении ВЛ на XX и наличии основного ($K_T = 0,1$) дополнительного торможения ($K_c = 0-1$)

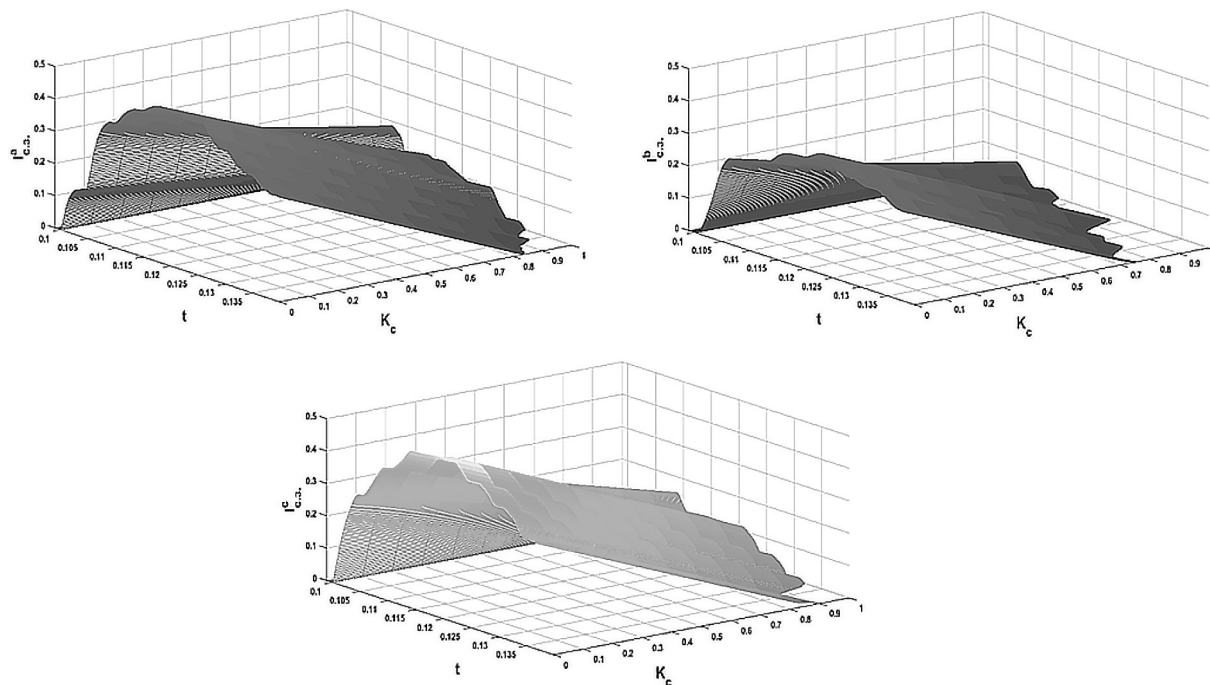


Рис. 9. Фазные токи срабатывания защиты при включении ВЛ на XX и наличии основного ($K_T = 0,2$) дополнительного торможения ($K_C = 0-1$)

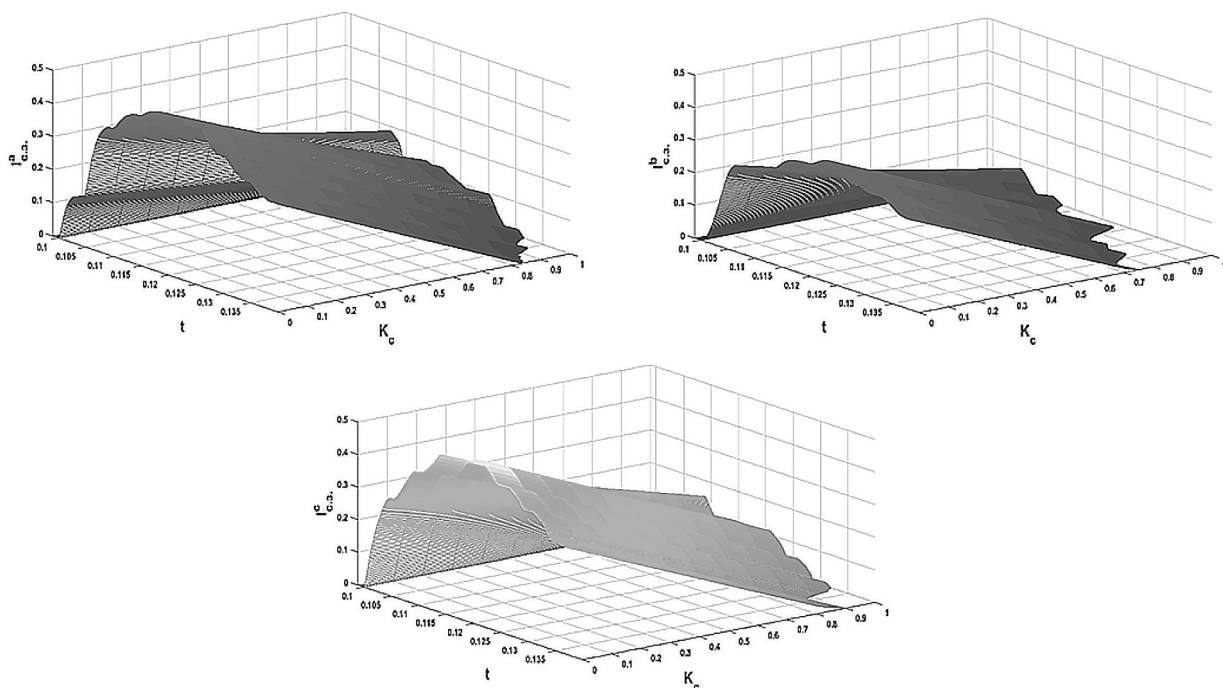
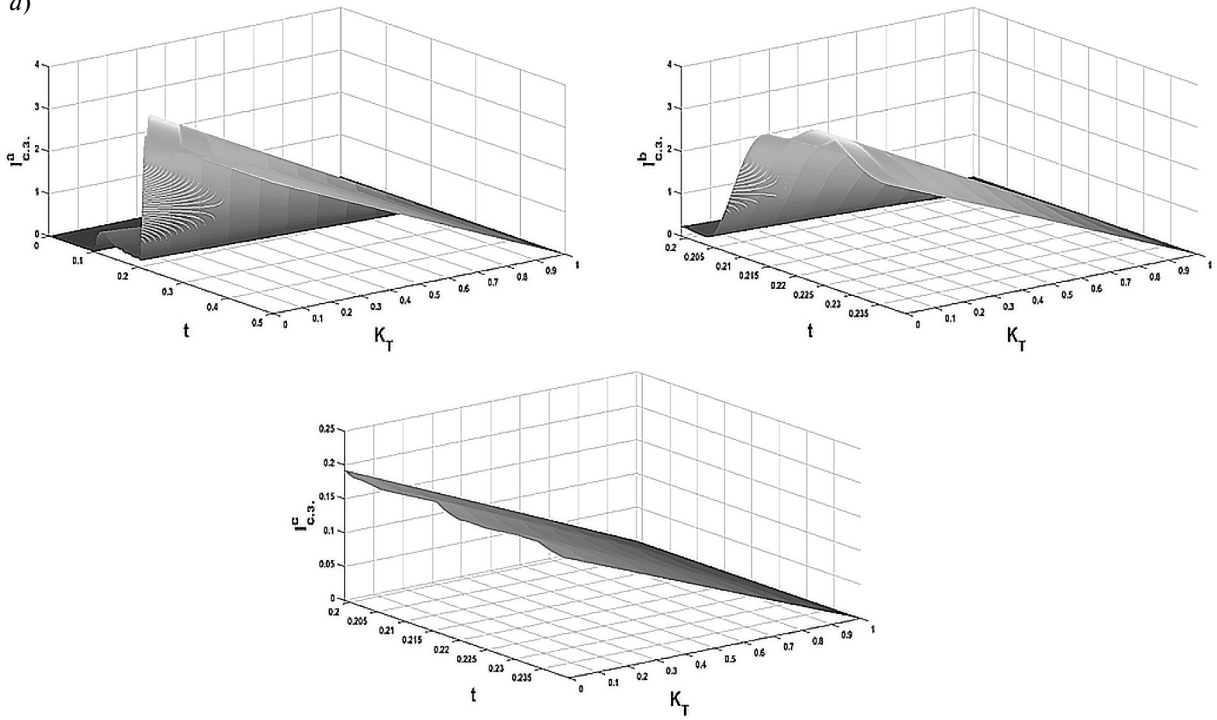


Рис. 10. Фазные токи срабатывания защиты при включении ВЛ на XX и наличии основного ($K_T = 0,5$) дополнительного торможения ($K_C = 0-1$)

a)



b)

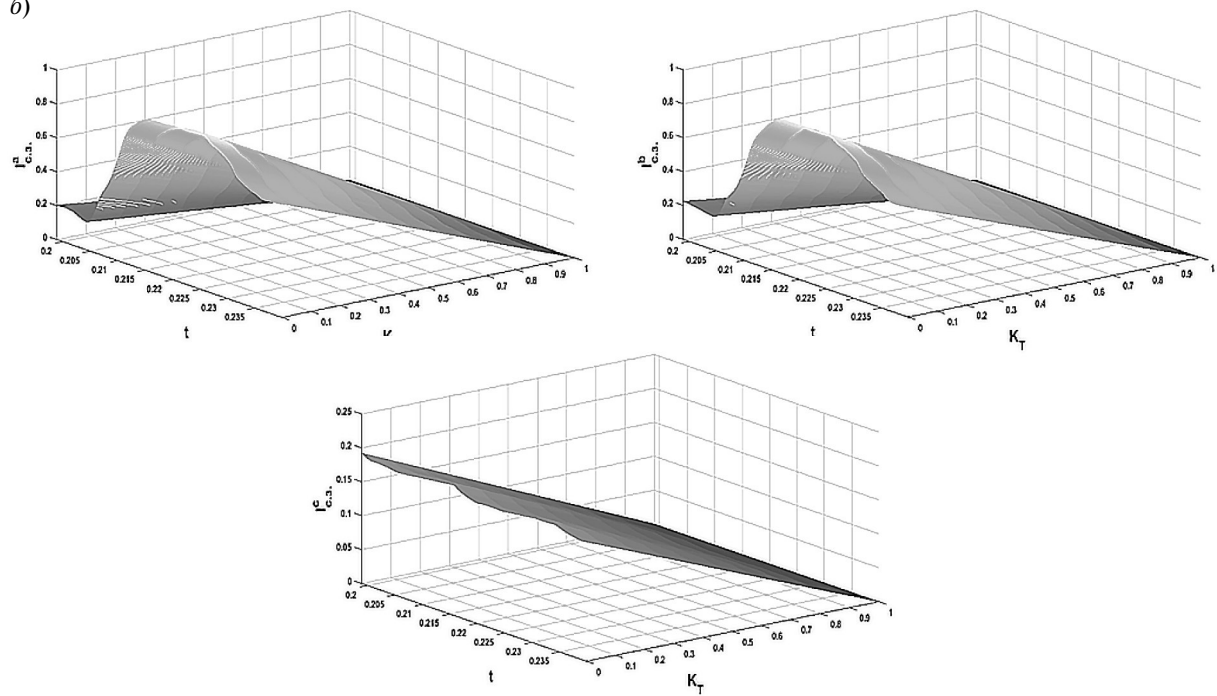


Рис. 11. Фазные токи срабатывания защиты при КЗ и наличии только основного торможения ($K_T = 0-1$, $K_C = 0$): а — междуфазное (AB) КЗ на шинах подстанции SS1; б — междуфазное (AB) КЗ на шинах подстанции SS2

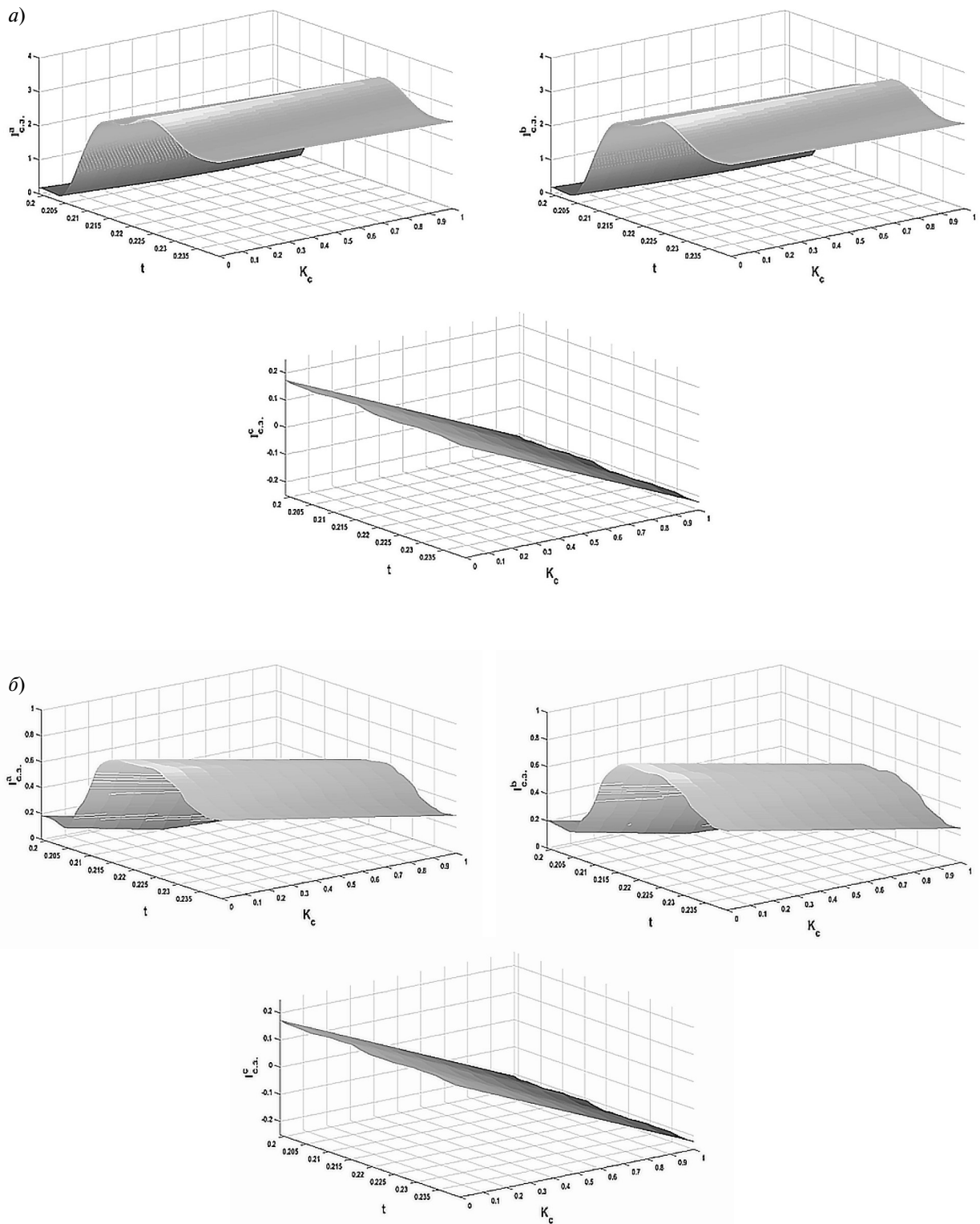


Рис. 12. Фазные токи срабатывания защиты при КЗ ВЛ и наличии основного ($K_T = 0,1$) дополнительного торможения ($K_c = 0-1$): *a* — междуфазное (AB) КЗ на шинах подстанции SS1; *б* — междуфазное (AB) КЗ на шинах подстанции SS2

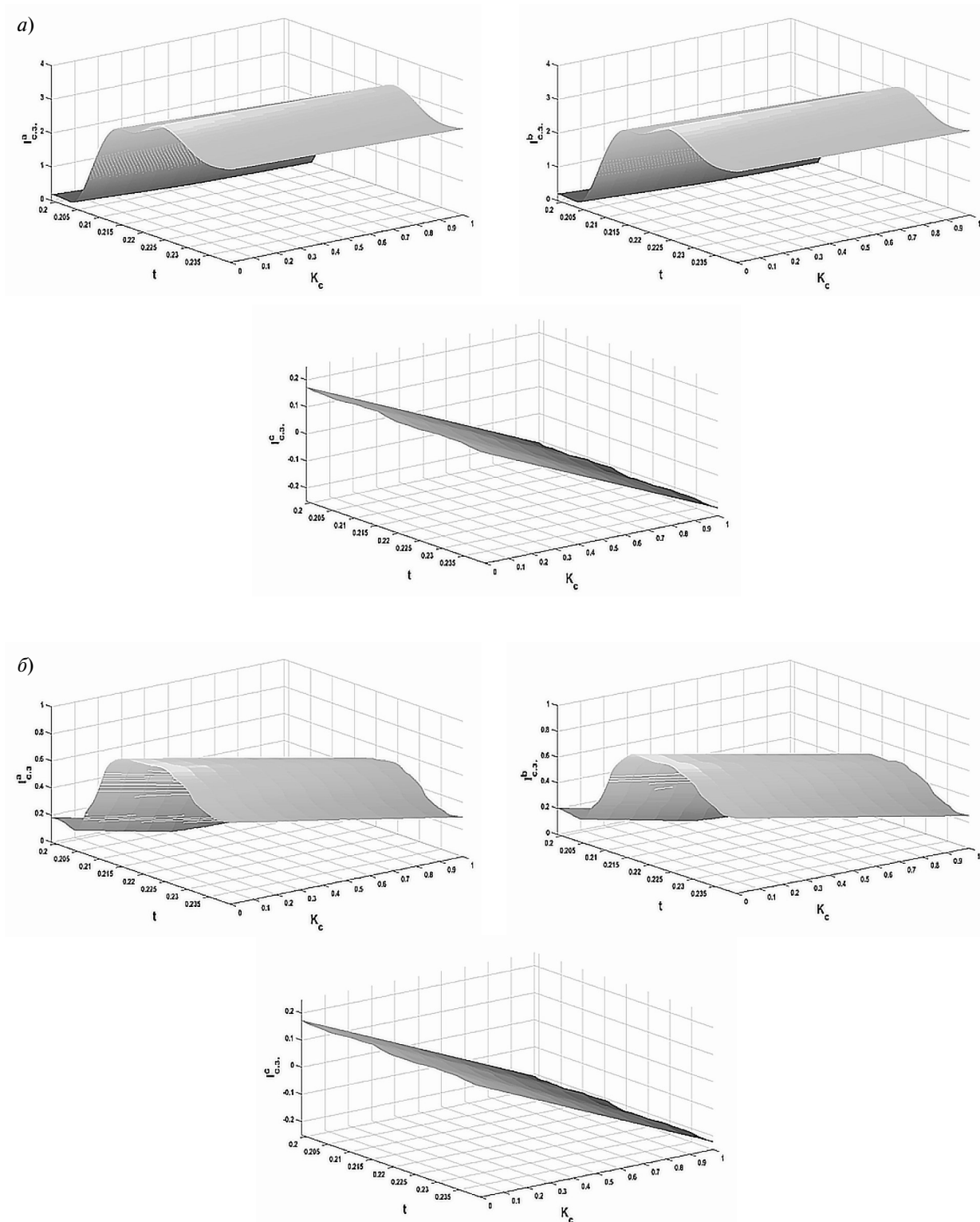


Рис. 13. Фазные токи срабатывания защиты при КЗ ВЛ и наличии основного ($K_T = 0,2$) дополнительного торможения ($K_C = 0 - 1$): а — междуфазное (АВ) КЗ на шинах подстанции SS1; б — междуфазное (АВ) КЗ на шинах подстанции SS2

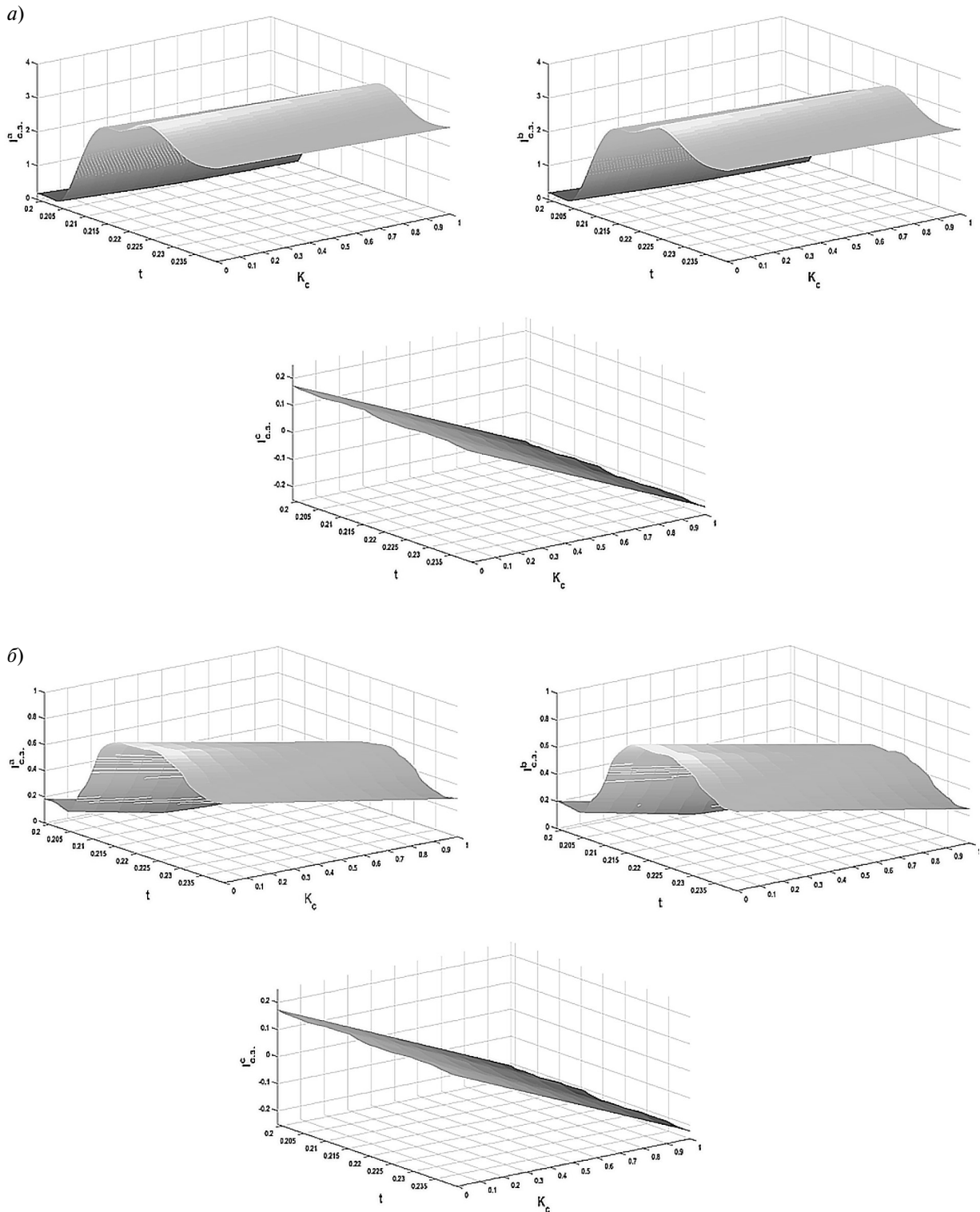


Рис. 14. Фазные токи срабатывания защиты при КЗ ВЛ и наличии основного ($K_T = 0,5$) дополнительного торможения ($K_C = 0 - 1$): *a* — междуфазное (AB) КЗ на шинах подстанции SS1; *b* — междуфазное (AB) КЗ на шинах подстанции SS2

Приведен сопоставительный анализ выбора минимального тока срабатывания, а также коэффициентов компенсации и торможения, требуемых предельными условиями эффективности торможения ($K_T \leq 0,5$) и достаточными условиями чувствительности ($I_{c3\min}^* = 0,1 - 0,2$ о.е.).

Показано, что при отсутствии компенсации емкостного фазного тока ВЛ ($K_c = 0$) для обеспечения селективной работы минимальный ток срабатывания защиты должен составлять более 0,562. Для достижения чувствительности и быстродействия необходимо, увеличения основного сигнала торможения до 65–85 % ($K_T = 0,65 - 0,85$).

Использование дополнительного торможения за счет компенсации емкостных токов ВЛ позволяет в значительной мере повысить чувствительность защиты ($I_{c3\min}^* = 0,2 - 0,25$ о.е.). Перекомпенсация на 90 % приводит к существенному увеличению чувствительности защиты при $I_{c3\min} = 0,1$ о.е.

При введении (разблокировке) основного алгоритма торможения блокировка сигнала дополнительного торможения даже при $K_c = 1$ не обязательна. Этот метод формирования тока торможения эффективен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ванин В.К., Попов М.Г., Попов С.О.** Моделирование фильтров тока намагничивания и воспроизведение вторичных токов силовых трансформаторов // Сб.: Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы X всероссийской научно-технической конференции. 2016. С. 268–269.

2. **Ванин В.К., Амбросовская Т. Д., Попов М.Г., Попов С.О.** Повышение достоверности работы измерительных цепей релейной защиты // Электрические станции. 2015. № 11. С. 30–35.

3. **Ванин В.К., Попов М.Г.** Теоретические основы цифровых средств релейной защиты и автоматики: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров «Системный анализ и управление» / В. К. Ванин, М. Г. Попов ; М-во образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский гос. Политехнический ун-т. Санкт-Петербург, 2012. Сер.: Приоритетный национальный проект «Образование».

4. **Ванин В.К., Попов М.Г., Попов С.О.** Повышение эффективности дифференциальных защит энергетического оборудования // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. № 3(130). С. 27–32.

5. **Попов М.Г.** Совершенствование методов численного расчета расстояния до места повреждения воздушных линий электропередачи // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. № 3(130). С. 54–61.

6. **Попов М.Г.** Система релейной защиты управляемой межсистемной электропередачи // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2010. № 2(100), Т. 2. С. 11–19.

7. **Бессолицын А.В., Новоселова О.А., Попов М.Г.** Разработка методики численного расчета продольных

параметров воздушной линии на основе трехмерной краевой задачи // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2010. № 2(100), Т. 2. С. 50–55.

8. **Бессолицын А.В., Попов М.Г., Хорошинина Е.Н.** Использование численного расчета трехмерного электростатического поля для определения собственных и взаимных емкостей проводов воздушной линии // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2010. № 2(100), Т. 2. С. 55–59.

9. **Ванин В.К., Попов М.Г.** Элементы систем автоматического управления в энергетике. Цифровая микроэлектроника систем управления и релейной защиты: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 220100 «Системный анализ и управление» / В. К. Ванин, М. Г. Попов ; Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербургский политехнический ун-т. Санкт-Петербург, 2008.

10. **Ванин В.К., Мокеев А.В., Попов М.Г.** Аналоговые и щитовые фильтры в измерительных условиях автоматики энергосистем: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 140400 «Техническая физика» / В.К. Ванин, А.В. Мокеев, М.Г. Попов ; Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. Санкт-Петербург, 2008.

11. **Ванин В.К., Попов М.Г.** Элементы автоматических устройств. Программирование микропроцессорных систем релейной защиты и автоматики : учебное пособие / В.К. Ванин, М.Г. Попов ; Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. Санкт-Петербург, 2007.

12. **Попов М.Г.** Определение мест коротких замыканий на высоковольтных линиях электропередачи // Энергетик. 2004. № 2. С. 44.

13. Попов М.Г., Мякушин М.Ю. Основные аспекты определения мест коротких замыканий на высоковольтных линиях электропередачи // Энергетик. 2002. № 10. С. 44.

14. Попов М.Г. Развитие методов и программного обеспечения исследований динамических свойств электроэнергетических систем: Дисс. ... кандидата технических наук / Санкт-Петербург, 2001.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АБОУ Накира Шади Солейман Хусейн — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: eng_shady2001@hotmail.com

ПОПОВ Максим Георгиевич — заведующий кафедрой “Электрические станции и автоматизация энергосистем” Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: PopovMG@eef.spbstu.ru

REFERENCES

1. Vanin V.K., Popov M.G., Popov S.O. Modelirovaniye filtrov toka namagnichivaniya i vosproizvedeniye vtorichnykh tokov silovykh transformatorov. Sb.: *Informatsionnyye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike materialy X vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. 2016. S. 268–269. (rus.)
2. Vanin V.K., Ambrosovskaya T.D., Popov M.G., Popov S.O. Povysheniye dostovernosti raboty izmeritelnykh tsepey releyной zashchity. *Elektricheskiye stantsii*. 2015. № 11. S. 30–35. (rus.)
3. Vanin V.K., Popov M.G. Teoreticheskiye osnovy tsifrovyykh sredstv releyной zashchity i avtomatiki: Uchebnoye posobiye dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy, obuchayushchikhsya po napravleniyu podgotovki magistriv «Sistemnyy analiz i upravleniye» / V.K. Vanin, M.G. Popov ; M-vo obrazovaniya i nauki Rossiyskoy Federatsii, Sankt-Peterburgskiy gos. Politekhnikeskiiy un-t. Sankt-Peterburg, 2012. Ser. Prioritetnyy natsionalnyy proyekt «Obrazovaniye» / Nats. Issled. Un-t. (rus.)
4. Vanin V.K., Popov M.G., Popov S.O. Povysheniye effektivnosti differentsialnykh zashchit energeticheskogo oborudovaniya. [Increase of efficiency of differential protection of the power equipment]. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2011. № 3(130). S. 27–32. (rus.)
5. Popov M.G. Sovershenstvovaniye metodov chislenogo rascheta rasstoyaniya do mesta povrezhdeniya vozdukhnykh liniy elektroperedachi [Perfection of methods of numerical calculation of distance to the place of damage of air-lines of the electricity transmission]. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2011. № 3(130). S. 54–61. (rus.)
6. Popov M.G. Sistema releyной zashchity upravlyayemyy mezhsistemnoy elektroperedachi [Relay protection of phase-controlling power transmission line]. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2010. № 2(100). T. 2. S. 11–19. (rus.)
7. Bessolitsyn A.V., Novoselova O.A., Popov M.G. Razrabotka metodiki chislennogo rascheta prodolnykh parametrov vozdukhnoy linii na osnove trekhmernoy krayevoy zadachi [Development of methodology for numerical calculation the series parameters of overhead transmission line on the basis of three-dimensional boundary problem]. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2010. № 2(100). T. 2. S. 50–55. (rus.)
8. Bessolitsyn A.V., Popov M.G., Khoroshinina Ye.N. Ispolzovaniye chislennogo rascheta trekhmernogo elektrostacheskogo polya dlya opredeleniya sobstvennykh i vzaimnykh yemkostey provodov vozdukhnoy linii [Using of numerical calculation of three-dimensional electrostatic field to determine self and mutual capacitance wires overhead lin]. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2010. № 2(100). T. 2. S. 55–59. (rus.)
9. Vanin V.K., Popov M.G. Elementy sistem avtomaticheskogo upravleniya v energetike. Tsifrovaya mikroelektronika sistem upravleniya i releyной zashchity: Uchebnoye posobiye dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy, obuchayushchikhsya po napravleniyu podgotovki magistriv «Sistemnyy analiz i upravleniye» / V.K. Vanin, M.G. Popov ; Federalnoye agentstvo po obrazovaniyu, Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskiiy un-t. Sankt-Peterburg, 2008. (rus.)
10. Vanin V.K., Mokeyev A.V., Popov M.G. Analogovyye i shchitovyye filtry v izmeritelnykh usloviyakh avtomatiki energosistem: Uchebnoye posobiye dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy, obuchayushchikhsya po napravleniyu podgotovki 140400 «Tekhnicheskaya fizika» / V.K. Vanin, A.V. Mokeyev, M.G. Popov ; Federalnoye agentstvo po obrazovaniyu, Sankt-Peterburgskiy gos. Politekhnikeskiiy un-t. Sankt-Peterburg, 2008. (rus.)
11. Vanin V.K., Popov M.G. Elementy avtomaticheskikh ustroystv. Programmirovaniye mikroprotsessornykh sistem releyной zashchity i avtomatiki : uchebnoye

posobiye / V.K. Vanin, M.G. Popov ; Federalnoye agentstvo po obrazovaniyu, Sankt-Peterburgskiy gos. Politekh-nicheskiy un-t. Sankt-Peterburg, 2007. (rus.)

12. **Popov M.G.** Opredeleniye mest korotkikh zamykaniy na vysokovoltnykh liniyakh elektroperedachi /m.g popov. *Energetik.* 2004. № 2. S. 44. (rus.)

13. **Popov M.G.** Razvitiye metodov i programmno

obespecheniya issledovaniy dinamicheskikh svoystv elektroenergeticheskikh system: Diss. ... kandidata tekhnicheskikh nauk / Sankt-Peterburg, 2001. (rus.)

14. **Popov M.G., Myakushin M.Yu.** Osnovnyye aspekty opredeleniya mest korotkikh zamykaniy na vysokovoltnykh liniyakh elektroperedachi. *Energetik.* 2002. № 10. S. 44. (rus.)

AUTHORS

ABOUNAKERA Shadi X. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.* 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: eng_shady2001@hotmail.com

POPOV Maxim G. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.* 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: PopovMG@eef.spbstu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 21.12.2016.