УДК 621.331.3.024

Е. К. Хусаинов, Ю. В. Кондратьев
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАВОК ЗАЩИТЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ВЫНУЖДЕННОМ РЕЖИМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРОТКОЗАМЫКАТЕЛЯ КЗКС-3,3

Аннотация. *Целью статьи является рассмотрение вопроса расчета и выбора уставок срабатывания короткозамыкателя КЗКС-3,3 при организации защиты контактной сети постоянного тока в вынужденном режиме. Измерительным органом короткозамыкателя является модуль напряжения. При выполнении условий срабатывания именно модуль напряжения собирает цепь на включение коммутационного аппарата короткозамыкателя. Важным является вопрос выбора оптимального места установки короткозамыкателей и уставки срабатывания по напряжению. Определена исходная информация, необходимая для проведения расчета уставок. Приведены порядок расчета токов короткого замыкания и схемы замещения для наиболее распространенных схем питания и секционирования контактной сети. Для токовых защит быстродействующих выключателей фидеров контактной сети приведены формулы определения зон чувствительности. Для выбора оптимального места установки короткозамыкателя и выбора уставки срабатывания по напряжению из допустимого диапазона построена потенциальная диаграмма участка контактной сети. Анализ, проведенный на основании потенциальной диаграммы, позволяет сделать вывод об эффективности организации защиты контактной сети в вынужденном режиме с использованием короткозамыкателей.*

Ключевые слова: *контактная сеть, короткозамыкатель, потенциальная диаграмма, уставка по напряжению, токовая защита, устройства защиты, тяговая подстанция.*

Yermek K. Khusainov, Yuri V. Kondratiev
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

CONTACT NETWORK PROTECTION SETTINGS METHODOLOGY DC IN FORMED MODE USING SHORT-CUTTER KZKS-3,3

Abstract. *The purpose of the article is to consider the issue of calculating and selecting the settings for the operation of the short-circuit switch KZKS-3.3 when organizing the protection of a direct current contact network in emergency mode. The shorting circuit is measured by the voltage module. When the triggering conditions are met, it is the voltage module that collects the circuit to turn on the switching device of the short circuit. The important question is to choose the optimal installation location of the short-circuit switches and the voltage trip settings. The initial information necessary for the calculation of the settings is determined. The calculation procedure and equivalent circuits for the most common power supply circuits and sectioning of the contact network are given. For current protection of high-speed circuit-breaker feeders, contact formulas are given for determining the sensitivity zones. To select the optimal installation location of the short-circuit and select the voltage pick-up setting from the allowable range, a potential diagram of the contact network section is constructed. The analysis based on the potential diagram allows us to conclude that the organization of protection of the contact network in emergency mode using short circuits is effective.*

Keywords: *contact network, short circuit, potential diagram, voltage setting, current protection, protection devices, traction substation.*

В ходе эксплуатации системы тягового электроснабжения постоянного тока, как в любой сложной системе, возникает необходимость технического обслуживания оборудования. Обслуживание проводится как периодически в соответствии с планом производства работ, составленным на основании нормативных документов, так и внепланово – для ликвидации аварийных замечаний и последствий повреждения.

В статье [1] рассмотрен вариант организации защиты контактной сети при выводе в ремонт оборудования распределительных устройств РУ-3,3 кВ тяговых подстанций (ТПС) и постов секционирования (ПСК) с использованием короткозамыкателя КЗКС-3,3 (далее – короткозамыкатель). Вынужденная схема питания и секционирования с использованием короткозамыкателей изображена на рисунке 1. Короткозамыкатели устанавливаются по одному на

каждый путь при схеме с включением секционных разъединителей «А» и «Б». Большое число короткозамыкателей считается излишним, так как рационально устанавливать устройство в точке с минимальным расчетным током короткого замыкания при нормальной схеме. В большинстве случаев такая точка находится под шинами тяговой подстанции с выведенным в ремонт РУ-3,3 кВ. Принцип действия короткозамыкателя заключается в следующем: при коротком замыкании в защищаемой зоне контактной сети срабатывает реле напряжения, реагирующее на снижение напряжения ниже уставки. Далее реле напряжения собирает цепь на включение короткозамыкателя. Короткозамыкатель перемещает место короткого замыкания в зону, которая надежно защищается быстродействующим выключателем ПСК, ликвидируя, таким образом, «мертвые» зоны. Более подробно принцип рассмотрен в статье [1].

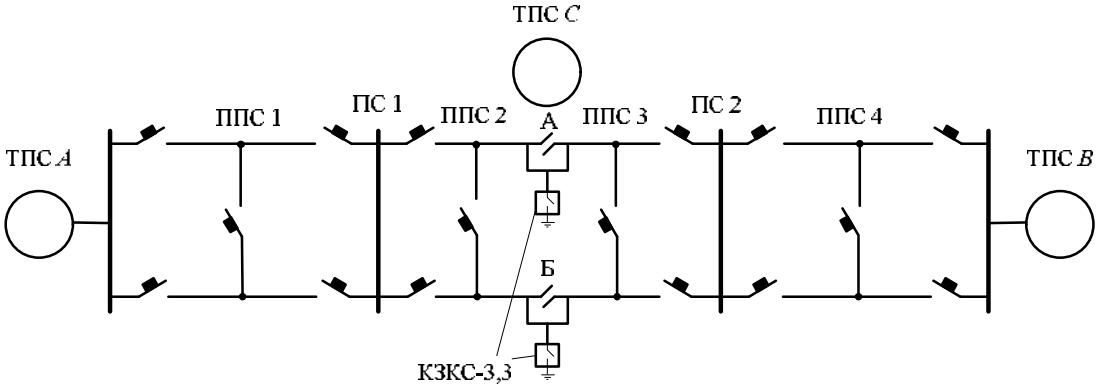

Рисунок 1 – Вынужденная схема питания и секционирования участка ТПС *А* – ТПС *В*

Вопрос защиты контактной сети постоянного тока от минимальных токов короткого замыкания при помощи короткозамыкателей уже рассматривался в источниках [2 – 5]. Однако применение короткозамыкателей ограничивалось из-за их повреждения вследствие перехода тяговых электродвигателей электроподвижного состава в генераторный режим и продолжительной подпитки ими места короткого замыкания. Ранее ВНИИЖТом разработан бесконтактный дуговой короткозамыкатель для заземления групп опор контактной сети. Позднее дополненный потенциальным датчиком короткозамыкатель получил название БКЗ-3,3. Усовершенствованное устройство стали использовать в качестве защитного аппарата при удаленных коротких замыканиях в контактной сети. Основные отличия КЗКС-3,3 от БКЗ-3,3 перечислены в статье [1]. Главное отличие – отсутствие дуги при срабатывании коммутационного аппарата. Отличительной особенностью короткозамыкателя является отсутствие нижней границы регулирования уставки срабатывания $U_у$. Короткозамыкатель БКЗ-3,3 устойчиво срабатывает, если минимальное напряжение в контактной сети не ниже 800 В.

Важным является вопрос выбора места установки короткозамыкателей и уставки срабатывания $U_у$. В статье [2] делается вывод том, что для определения места установки короткозамыкателей и уставки срабатывания $U_у$ необходимо провести анализ потенциальных диаграмм при коротких замыканиях в расчетных точках защиты. Перед построением потенциальных диаграмм необходимы следующие исходные данные: схема питания и секционирования контактной сети; значение сопротивления ТПС; типы быстродействующих выключателей (БВ) и их уставки; параметры сопротивлений тяговой сети и питающего фидера. Стоит отметить, что для остальных БВ ТПС, ПСК и пунктов параллельного соединения участка (ППС), для которого ведется расчет уставок защит при вынужденном режиме, расчетные схемы и формулы соответствуют приведенным в работах [6, 7]. Необходимый состав защит представлен в источниках [8, 9].

Сопротивление тяговой подстанции вычисляют по формуле [6]

$$R_п = \rho + R_{с.у} + R_{о.ф}, . \quad (1)$$

где ρ – внутреннее сопротивление ТПС, Ом; $R_{с.у}$ – сопротивление сглаживающего устройства, Ом; $R_{о.ф}$ – сопротивление отсасывающего фидера, Ом.

Внутреннее сопротивление ТПС вычисляют по формуле [6]

$$\rho = \frac{AX_* U_н}{(1 - AX_*) n_т I_н}.$$

где A – коэффициент относительного наклона внешней характеристики тягового преобразователя; $U_н$ – номинальное напряжение на шинах выпрямленного тока, В; $I_н$ – номинальный ток одного тягового преобразователя, А; $n_т$ – число включенных в работу тяговых преобразователей; X_* – суммарное индуктивное сопротивление, включенное в каждый из линейных проводов вторичных обмоток тягового преобразователя, выраженное в относительных единицах.

Величину X_* вычисляют по формуле [6]:

$$X_* = \frac{S_т n_т}{S_с} + \frac{(1 \pm \alpha_з) u_{кп} S_т n_т}{100 S_п n_п} + \frac{(1 \pm \alpha_з) u_{кт}}{100}, \quad (3)$$

где $S_т$, $S_п$ – номинальные мощности первичных обмоток соответственно тягового преобразователя и силового (понижающего) трансформаторов, МВ·А; $S_с$ – мощность короткого замыкания на вводах в тяговую подстанцию, МВ·А; $u_{кт}$, $u_{кп}$ – напряжения короткого замыкания соответственно преобразовательного и понижающего трансформаторов, %; $\alpha_з$ – заводской допуск на величину напряжения короткого замыкания; $n_п$ – число включенных в работу понижающих трансформаторов.

Расчетное напряжение $U_{рас}$ ТПС вычисляют по формуле [6]

$$U_{рас} = \frac{(1 \pm \alpha_н) U_н}{1 - AX_*} + к_{нп} n_Т I_н R_п, \quad (4)$$

где $\alpha_н$ – допуск на величину отклонения напряжения на вводах в тяговую подстанцию; $к_{нп}$ – коэффициент загрузки неповрежденных путей.

Далее определяем значения токов смежных ТПС I_A, I_B и суммарного тока $I_К$ в месте короткого замыкания по формулам [6]:

$$I_A = \frac{(U_{Aрас} - U_Д)\left(1 + \frac{R_{AB}}{R_B}\right) - (U_{Bрас} - U_Д)\frac{R_{AB}}{R_B}}{R_A + R_{AB}\left(1 + \frac{R_A}{R_B}\right)}; \quad (5)$$

$$I_B = \frac{(U_{Bрас} - U_Д)\left(1 + \frac{R_{AB}}{R_A}\right) - (U_{Aрас} - U_Д)\frac{R_{AB}}{R_A}}{R_B + R_{AB}\left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right)}; \quad (6)$$

$$I_К = I_A + I_B, \quad (7)$$

где $U_{Aрас}$, $U_{Bрас}$ – расчетные напряжения смежных ТПС A и B, В; $U_Д$ – падение напряжения в электрической дуге в месте повреждения, В; R_A, R_B, R_{AB} – результирующие сопротивления схемы замещения межподстанционной зоны при заданных схеме питания и месте короткого замыкания, Ом.

Для упрощения расчетов допускается принимать расчетные значения $U_{A.\text{рас}}$, $U_{B.\text{рас}}$ смежных ТПС A и B одинаковыми: $U_{A\text{рас}} = U_{B\text{рас}} = U_{\text{рас}}$.

Токи ТПС A и B вычисляют по формулам [6]:

$$I_A = \frac{\left(U_{\text{рас}} - U_{\text{Д}}\right)}{R_A + R_{AB}\left(1 + \dfrac{R_A}{R_B}\right)}; \tag{8}$$

$$I_B = \frac{\left(U_{\text{рас}} - U_{\text{Д}}\right)}{R_B + R_{AB}\left(1 + \dfrac{R_B}{R_A}\right)}. \tag{9}$$

Значение падения напряжения в дуге $U_{\text{Д}}$ вычисляют по формуле [6]

$$U_{\text{Д}} = 1350\ L_{\text{у}} n_{\text{из}} b, \tag{10}$$

где $L_{\text{у}}$ – длина пути утечки по поверхности одного изолятора, м; $n_{\text{из}}$ – число изоляторов в гирлянде; b – коэффициент, учитывающий возможность развития дуги по наикратчайшему пути в воздухе.

Значения результирующих сопротивлений схемы замещения, представленной на рисунке 2, вычисляют по формулам [6]:

$$R_A = R_{\text{п}.A} + R_{\text{тс}.A}; \tag{11}$$

$$R_B = R_{\text{п}.B} + R_{\text{тс}.B}; \tag{12}$$

$$R_{AB} = R_{\text{тс}.AB} + R_{\text{ТГЗ}}, \tag{13}$$

где $R_{\text{п}.A}$, $R_{\text{п}.B}$ – сопротивления тяговых подстанций A и B; $R_{\text{тс}.A}$ – сопротивление части схемы замещения тяговой сети (контактной сети и рельсов), по которой протекает ток I_A ТПС A, Ом; $R_{\text{тс}.B}$ – сопротивление части схемы замещения тяговой сети (контактной сети и рельсов), по которой протекает ток I_B ТПС B, Ом; $R_{\text{тс}.AB}$ – сопротивление части схемы замещения тяговой сети (контактной сети и рельсов), по которой протекает сумма токов $I_{\text{К}} = I_A + I_B$, Ом; $R_{\text{ТГЗ}}$ – сопротивление троса группового заземления, Ом.

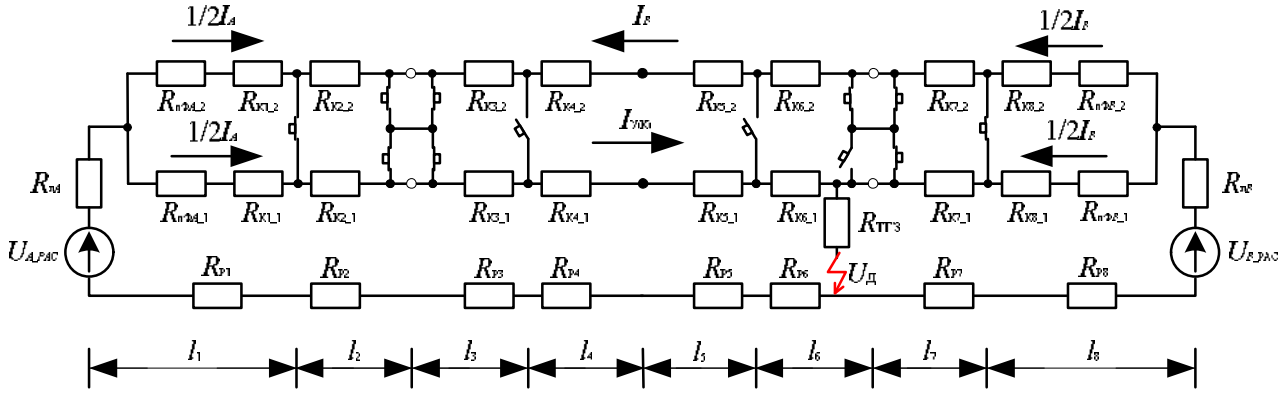

Рисунок 2 – Схема замещения определения минимального тока короткого замыкания при выборе уставок защит поста секционирования при вынужденном режиме

На рисунке 2 введены следующие обозначения: $R_{\text{пф}.A_1}$, $R_{\text{пф}.A_2}$ – сопротивления питающих линий ТПС A; $R_{\text{К}j_1}$, $R_{\text{К}j_2}$ – сопротивления контактной сети участка l_j; $R_{\text{Р}j}$ – сопротивление рельсовой цепи участка l_j.

При использовании короткозамыкателя для обеспечения требований защиты контактной сети необходимо выбирать схемы, при которых модуль напряжения должен срабатывать при повреждении в зоне нечувствительности основных токовых защит БВ ТПС, ПСК и ППС.

Рассмотрим подробно параллельную схему питания двухпутного электрифицированного участка при вынужденном режиме, изображенную на рисунке 1. Зоны нечувствительности ПСК и ППС находятся вблизи смежного ПСК, и самой удаленной точкой являются шины ПСК.

В большинстве случаев при выводе в ремонт РУ-3,3 кВ ТПС пункты параллельного соединения, находящиеся между ПСК, отключают по причине нечувствительности защит БВ к короткому замыканию у удаленного ПСК. Еще одним преимуществом применения вынужденного режима с использованием короткозамыкателей является наличие включенных ППС между ПСК.

При проведении анализа потенциальной диаграммы участка важно правильно определить зону чувствительности токовых защит БВ ПСК и ППС. Зону чувствительности токовых защит ТПС не проверяют, так как протяженность зоны защиты и расчетная схема выбора уставок БВ остались прежними. Метод определения зоны чувствительности немногим отличается от соотношения, приведенного в работе [2], и учитывает сопротивление троса группового заземления. Протяженность зоны чувствительности токовой защиты вычисляется по формуле

$$L_{\text{зч}} = \frac{\left(R_{AB} - R_{\text{ТГЗ}}\right)}{\text{r}_{\text{к.с}}}, \tag{14}$$

где $L_{\text{зч}}$ – протяженность зоны чувствительности токовой защиты, км; $r_{\text{к.с}}$ – удельное сопротивление контактной сети, Ом/км.

Известно, что при определении уставок БВ допускается каскадное действие защит. При организации вынужденного режима наиболее удаленной точкой короткого замыкания для БВ ПСК 1 являются шины смежного поста секционирования ПСК 2. По условию каскадности действия защит сначала отключается БВ ПСК 2, далее – БВ ППС 3, затем – БВ ППС 2, а после – БВ ПСК 1, тем самым выделяется поврежденная секция.

Зона чувствительности токовой защиты БВ постов секционирования определяется в соответствии с расчетными схемами короткого замыкания при вынужденных режимах питания межподстанционной зоны, приведенными в источнике [6]. Схема выбора уставок защит поста секционирования при вынужденном режиме изображена на рисунке 2. Ток короткого замыкания для параллельной схемы питания определяется как сумма тока фидера смежного пути участка, находящегося между постами секционирования, и токов фидеров поста секционирования, находящихся «за спиной». В этом случае $I_{\text{К}}$ условно принимается равным току уставки быстродействующего выключателя поста секционирования $I_{\text{У}}$. Выразим $I_{\text{У}}$ через формулы (8) и (9) [6]:

$$I_{\text{у}} = \frac{\left(U_{\text{рас}} - U_{\text{Д}}\right)}{R_A + R_{AB}\left(1 + \dfrac{R_A}{R_B}\right)} + \frac{\left(U_{\text{рас}} - U_{\text{Д}}\right)}{R_B + R_{AB}\left(1 + \dfrac{R_B}{R_A}\right)}. \tag{15}$$

Для определения протяженности зоны чувствительности токовой защиты БВ необходимо вычислить значение R_{AB}. Преобразуя выражение (15), получаем квадратное уравнение:

$$\left(2 + \frac{3R_A}{2R_B}\right)R_{AB}^2 + 2\left(R_A + R_B\right)R_{AB} + \left(R_A R_B - \frac{2\left(U_{\text{рас}} - U_{\text{Д}}\right)}{I_{\text{у}}}\right) = 0. \tag{16}$$

Так как значение сопротивления R_{AB} должно быть только положительным, то вычисляем только один корень уравнения:

$$R_{AB} = \frac{-2(R_A + R_B) + \sqrt{(2(R_A + R_B))^2 - 4\left(2 + \frac{3R_A}{2R_B}\right)\left(R_A R_B - \frac{2(U_{\text{рас}} - U_{\text{Д}})}{I_{\text{у}}}\right)}}{2\left(2 + \frac{3R_A}{2R_B}\right)}, \qquad (17)$$

Значения сопротивления R_A и R_B при определении R_{AB} для ПСК вычисляют по формулам:

$$R_A = R_{\text{п}A} + \frac{\left(r_{\text{пф}.A} l_{\text{пф}A} + r_{\text{кс}}(l_1 + l_2)\right)}{2} + r_{\text{р}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6); \qquad (18)$$

$$R_B = R_{\text{п}B} + r_{\text{кс}}(l_3 + l_4 + l_5 + l_6) + \frac{\left(r_{\text{пф}.B} l_{\text{пф}.B} + r_{\text{кс}}(l_7 + l_8)\right)}{2} + r_{\text{р}}(l_7 + l_8). \qquad (19)$$

Зона чувствительности токовой защиты БВ ППС определяется в соответствии с расчетной схемой короткого замыкания при вынужденных режимах питания межподстанционной зоны, приведенной в источнике [6]. Схема замещения для выбора уставок защит ППС при вынужденном режиме изображена на рисунке 3.

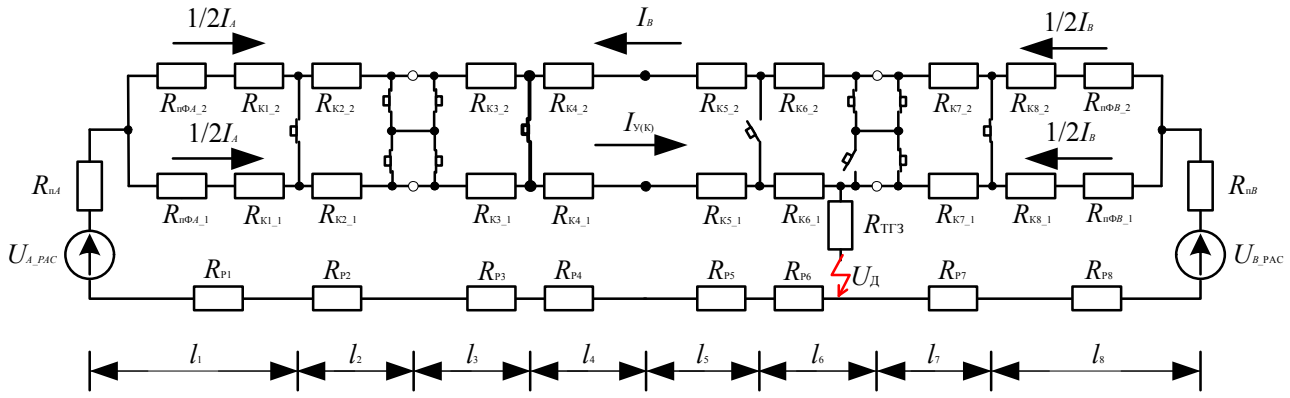

Рисунок 3 – Схема замещения определения минимального тока короткого замыкания при выборе уставок защит пункта ППС при вынужденном режиме

Протяженность зоны чувствительности токовой защиты БВ ППС, как и для ПСК, определяется по формуле (15) с некоторыми изменениями в вычислении тока уставки быстродействующего выключателя:

$$I_{\text{у}} = \frac{\frac{1}{2}(U_{\text{рас}} - U_{\text{Д}})}{R_A + R_{AB}\left(1 + \frac{R_A}{R_B}\right)} + \frac{(U_{\text{рас}} - U_{\text{Д}})}{R_B + R_{AB}\left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right)}. \qquad (20)$$

Вычисляем значение R_{AB}. Преобразуя выражение (20), получаем квадратное уравнение:

$$\left(2+\frac{3R_A}{2R_B}\right)R_{AB}^2+2\left(R_A+R_B\right)R_{AB}+\left(R_AR_B-\frac{\frac{3}{2}\left(U_{\text{рас}}-U_{\text{Д}}\right)}{I_{\text{у}}}\right)=0\,. \qquad (21)$$

Сопротивление R_{AB} должно иметь только положительное значение:

$$R_{AB}=\frac{-2\left(R_A+R_B\right)+\sqrt{\left(2\left(R_A+R_B\right)\right)^2-4\left(2+\frac{3R_A}{2R_B}\right)\left(R_AR_B-\frac{\frac{3}{2}\left(U_{\text{рас}}-U_{\text{Д}}\right)}{I_y}\right)}}{2\left(2+\frac{3R_A}{2R_B}\right)}\,. \qquad (22)$$

Значения сопротивления R_A и R_B при определении R_{AB} для ППС вычисляют по формулам:

$$R_A=R_{\text{п}A}+\frac{\left(r_{\text{пф}.A}l_{\text{пф}.A}+r_{\text{кс}}\left(l_1+l_2+l_3\right)\right)}{2}+r_{\text{р}}\left(l_1+l_2+l_3+l_4+l_5+l_6\right); \qquad (23)$$

$$R_B=R_{\text{п}B}+r_{\text{кс}}\left(l_4+l_5+l_6\right)+\frac{\left(r_{\text{пф}.B}l_{\text{пф}.B}+r_{\text{кс}}\left(l_7+l_8\right)\right)}{2}+r_{\text{р}}\left(l_7+l_8\right). \qquad (24)$$

Для построения потенциальной диаграммы необходимо определить уровни напряжения в нескольких точках защищаемой зоны. В большинстве случаев достаточно уровней напряжения на шинах тяговых подстанций, постов секционирования, пунктов параллельного соединения и в удаленной точке зоны защиты. Расчеты необходимо проводить отдельно для каждого пути. При равенстве сечений контактных сетей расчеты проводятся только для одного пути.

Напряжение на шинах тяговой подстанции в режиме короткого замыкания $U_{\text{к.з.ТПС}}$ определяется по расчетной схеме. Ток короткого замыкания $I_{\text{К}}$ вычисляется по формуле (8):

$$U_{\text{к.з.ТПС}}=U_{\text{рас}}-I_{\text{к}}R_{\text{п}}\,. \qquad (25)$$

Уровень напряжения на шинах поста секционирования ПСК1 при коротком замыкании под шинами поста секционирования ПСК2 определяется по формуле (18). Для определения напряжения на шинах поста секционирования ПСК2 при коротком замыкании под шинами поста секционирования ПСК1 значения зеркально отображаются относительно тяговой подстанции C:

$$U_{\text{к.з.ПС}}=U_{\text{к.з.ТПС}}-I_{\text{к}}\left(\frac{\left(r_{\text{пф}A}l_{\text{пф}A}+r_{\text{к.с}}\left(l_1+l_2\right)\right)}{2}+r_{\text{р}}\left(l_1+l_2\right)\right). \qquad (26)$$

Уровень напряжения у пункта параллельного соединения ППС 2 при коротком замыкании под шинами поста секционирования ПС2 определяется по формуле

$$U_{\text{к.з.ППС}}=U_{\text{к.з.ТПС}}-I_{\text{к}}\left(\frac{\left(r_{\text{пф}A}l_{\text{пф}A}+r_{\text{к.с}}\left(l_1+l_2+l_3\right)\right)}{2}+r_{\text{р}}\left(l_1+l_2+l_3\right)\right). \qquad (27)$$

Для определения напряжения у пункта параллельного соединения ППС 3 при коротком замыкании под шинами поста секционирования ПСК1 значения зеркально отображаются относительно тяговой подстанции *С* по рисунку 4.

Потенциальная диаграмма при коротком замыкании по расчетным схемам выбора уставок защит БВ ПСК при вынужденном режиме изображена на рисунке 4. Как видно из приведенной диаграммы, оптимальным местом установки короткозамыкателя КЗКС-3,3 является место пересечения кривых напряжения, так как при установке в этой точке верхние пределы уровней напряжения имеют минимально возможное значение при условии их равенства. В нашем случае это пересечение совпало с координатой ТПС *С*, оборудование РУ-3,3 кВ которой выведено в ремонт. Однако при расположении точки пересечения потенциальных диаграмм в месте, отличном от координат ТПС, в любом случае наиболее подходящим местом установки являются координаты линейных объектов СТЭ (ТПС, ПСК, ППС).

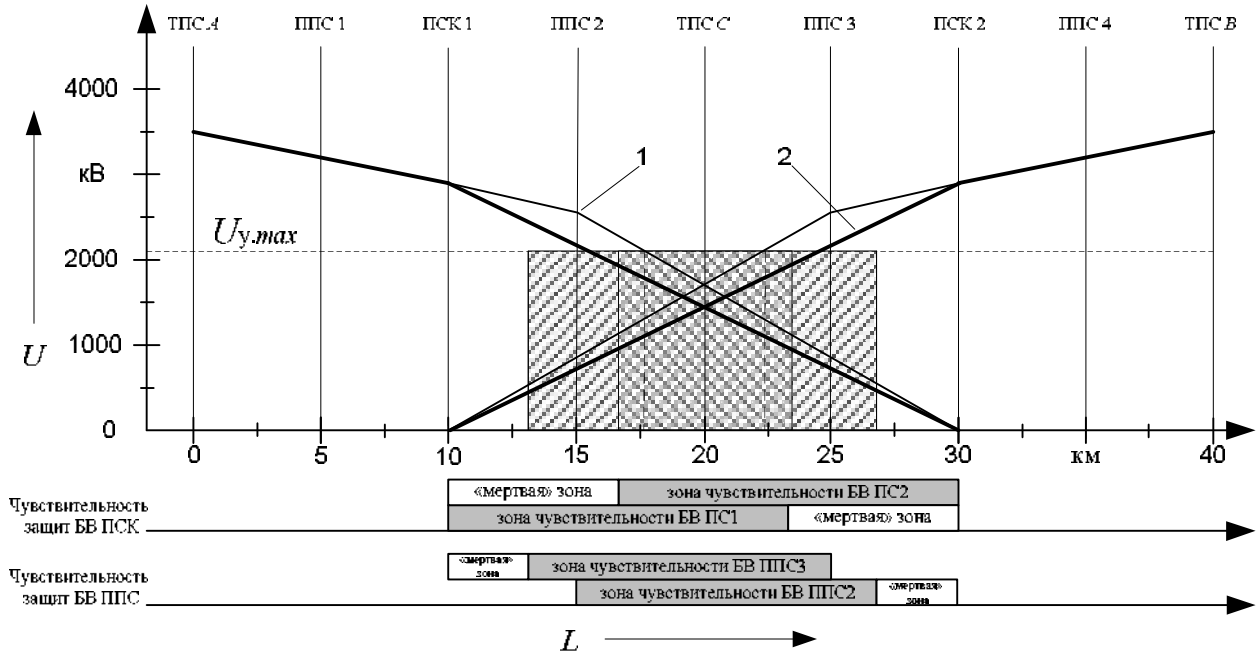

Рисунок 4 – Потенциальная диаграмма уровней напряжения при коротких замыканиях при вынужденном режиме:1 – кривая напряжения при схеме с включенными БВ ППС; 2 – кривая напряжения при схеме с отключенными БВ ППС

При организации вынужденного режима питания и секционирования контактной сети с включенными БВ ППС 2 и ППС 3 местом рекомендуемой установки короткозамыкателя является область, выделенная двухсторонней штриховкой, ограниченная прерывистыми линиями по вертикали, при отключенных БВ ППС 2 и ППС 3 – область, выделенная двухсторонней штриховкой, ограниченная сплошными линиями по вертикали.

Верхний предел срабатывания $U_{\text{у}\max}$ короткозамыкателя определяется исходя от требования отстройки от режимов нормальной работы системы тягового электроснабжения постоянного тока. В соответствии с рекомендациями работы [6] защита от коротких замыканий должна быть отстроена от максимальных нагрузок нормального режима работы, скачков тока при проследовании поездом секционного изолятора или изолирующего сопряжения, а также от повреждений, отключаемых выключателем локомотива или выключателями смежных участков. Уставка срабатывания $U_{\text{у}max}$ должна отвечать следующему условию [6]:

$$U_{\text{у}\max} \le \frac{U_{\text{н}\min}}{k_{\text{з}} k_{\text{в}}}, \tag{28}$$

где $U_{нmin}$ – наименьшее допустимое напряжение в контактной сети в нормальном режиме, В; $k_з$, $k_в$ – коэффициенты запаса и возврата.

Коэффициент запаса $k_з$ принимают не менее чем от 1,1 до 1,3. Коэффициент возврата $k_в$ принимают от 1,1 до 1,15. Коэффициенты выбраны в соответствии с рекомендациями работы [6].

Согласно источнику [10] минимально допустимое значение напряжения $U_{нmin}$ на токоприемнике электроподвижного состава – 2700 В. Для проверки отстройки полученного значения $U_{у_max}$ на потенциальной диаграмме проводят линию параллельную оси абсцисс, образуя тем самым зону срабатывания короткозамыкателя.

Предложенная методика расчета и выбора уставок срабатывания короткозамыкателя и построенная на основании расчета потенциальная диаграмма позволяют определить допустимый диапазон изменения уставок по напряжению с учетом параметров места повреждения, обеспечить чувствительности защит и выявить места установки короткозамыкателей, удовлетворяющие необходимым условиям.

Список литературы

1. Кондратьев, Ю. В. Обеспечение защиты контактной сети постоянного тока при вынужденных режимах [Текст] / Ю. В. Кондратьев, В. А. Кващук, Е. К. Хусаинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 4 (36). – С. 87 – 95.

2. Защита контактной сети постоянного тока от минимальных токов короткого замыкания при помощи короткозамыкателей [Текст] / Ю. Г. Санников, О. С. Катунин и др.// Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 1989. – № 8. – С. 18 – 21.

3. Кучма К. Г. Защита от токов короткого замыкания в контактной сети [Текст] / К. Г. Кучма, Г. Г. Марквардт, В. Н. Пупынин – М.: Трансжелдориздат, 1960. – 259 с.

4. Сердинов, С. М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог [Текст] / С. М. Сердинов – М.: Транспорт, 1985. – 301 с.

5. Хариков, В. Ф. Защита контактной сети постоянного тока от коротких замыканий [Текст] / В. Ф. Хариков. – М.: Транспорт, 1987. – 95 с.

6. СТО РЖД 07.021.5-2018. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 5. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения постоянного тока [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2018. – 107 с.

7. Векслер, М. И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания [Текст] / М. И. Векслер. – М.: Транспорт, 1976. – 120 с.

8. СТО РЖД 07.021.1-2015. «Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 1. Общие принципы и правила построения защит, блокировок и автоматики в системах тягового электроснабжения» [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2015. – 33 с.

9. СТО РЖД 07.021.2-2015. «Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 2. Методика выбора алгоритмов действия, уставок блокировок и выдержек времени автоматики в системе тягового электроснабжения» [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2015. – 13 с.

10. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [Текст]/ ОАО «РЖД». – М., 2011. – 255 с.

References

1. Kondratiev Yu. V., Kvashchuk V. A., Khusainov Ye. K. Ensuring the protection of the contact network of direct current under forced modes [Obespecheniye zashchity kontaktnoy seti postoyannogo toka pri vynuzhdennykh rezhimakh]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies,* 2018, no. 4 (36), pp. 87 –95.

2. Sannikov Yu. G., Katunin O. S., Kryukov I. S., Farafonov A. V. Protection of a direct-current contact network from minimum short-circuit currents with the help of short-circuits [Zash-

chita kontaktnoy seti postoyannogo toka ot minimal'nykh to-kov korotkogo zamykaniya pri pomoshchi korotkozamykateley]. *Vestnik VNIIZHT*, 1989. no. 8, pp. 18 – 21.

3. Kuchma K. G., Marquardt G. G., Pupynin V. N. *Zashchita ot tokov korotkogo zamykaniya v kontaktnoy seti* (Protection against short circuit currents in the contact network). M.: Transdeldorizdat, 1960, 259 p.

4. Serdinov S. M. *Povysheniye nadezhnosti elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* (Increase of reliability of power supply devices of electrified railways). Moscow: Transport, 1985, 301 p.

5. Kharikov V. F. *Zashchita kontaktnoy seti postoyannogo toka ot korotkikh zamykaniy* (Protecting the contact network of direct current from short-circuits). Moscow: Transport, 1987, 95 p.

6. *STO RZHD 07.021.5-2018 «Zashchita system elektrosnabzheniy azheleznoy dorogi ot korotkikh zamykaniy i peregruzki. Chast'5. Metodika vybora ustavok zashchit v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka»* (STR RZD 07.021.5-2018 «Protection of power supply systems of the railway from short circuits and overload. Part 5. Method of selection of protection settings in the DC traction system»). Moscow, JSCo «Russian Railways», 2018, 107 p.

7. Wexler M. I. *Zashchita tyagovoy seti postoyannogo toka ot tokov korotkogo zamykaniya* (Protection of traction DC network against short-circuit currents). Moscow: Transport, 1976, 120 p.

8. *STO RZHD 07.021.1-2015 «Zashchita system elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh zamykaniyi peregruzki. Chas1 Obshchiye printsipy i pravila postroyeniya zashchitnykh blokirovok i avtomatiki v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya »* (SRT RZD 07.021.1-2015 «Protection of power supply systems of the railway from short circuits and overload. Part 1. General principles and rules for constructing protections, locks and automatics in traction power supply systems»). Moscow, JSCo «Russian Railways», 2015, 33 p.

9. *STO RZHD 07.021.2-2015 «Zashchita system elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh zamykaniyi peregruzki. Chast' 2. Metodika vybora algoritmov deystviya ustavok blokirovok I vyderzhek vremeni avtomatiki v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya»* (STR RZD 07.021.2-2015 «Protection of power supply systems of the railway from short circuits and overload. Part 2. The method of choosing action algorithms, blocking settings and time delays of automation in the traction power supply system»). Moscow, JSCo «Russian Railways», 2015, 13 p.

10. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii* (Rules of technical operation of railways of the Russian Federation), Moscow, Russian Railways, 2011, 255 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хусаинов Ермек Кенжебулатович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 44-27-61.
E-mail: husainov0908@rambler.ru

Кондратьев Юрий Владимирович
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-46.
E-mail: Juvk.omgups.egt@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Khusainov Yermek Kenzhebulatovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Postgraduate student of the department "Electricity supply of railway transport", OSTU.
Tel .: (3812) 44-27-61.
E-mail: husainov0908@rambler.ru

Kondratiev Yuri Vladimirovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.
Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department "Electricity supply of railway transport", OmGUPS.
Tel .: (3812) 31-34-46.
E-mail: Juvk.omgups.egt@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Хусаинов, Е. К. Методика определения уставок защиты контактной сети постоянного тока в вынужденном режиме с использованием короткозамыкателя КЗКС-3,3 [Текст] / Е. К. Хусаинов, Ю. В. Кондратьев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 3 (39). – С. 68 – 78.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Khusainov Ye. K., Kondratiev Yu. V. Contact network protection settings methodology DC in formed mode using short-cutter KZKS-3,3. Journal of transsib railway studies, 2019, vol. 3, no. 39, pp. 68 – 78 (In Russian).

УДК 629.4.016.12:004.94

П. А. Сахаров
Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ), г. Гомель, Беларусь

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГЛОЩАЮЩИХ АППАРАТОВ НА СИЛЫ МЕЖДУ ВАГОНАМИ ПОЕЗДА

Аннотация. *Рассмотрено влияние силовых характеристик поглощающих аппаратов на величину максимальных продольных сил, возникающих между вагонами. С помощью компьютерной программы MSC.ADAMS выполнено имитационное моделирование маневрового соударения вагонов и переходных процессов в движущемся поезде. Определены зависимости максимальных сил столкновения вагонов при различных скоростях движения от формы силовых характеристик упругих элементов. Произведена оценка работы различных амортизаторов при трогании поезда с мести, электрическом торможении и движении через переломы продольного профиля пути. Показано, что амортизаторы с быстро нарастающей линией нагрузки приводят к возникновению и распространению вдоль поезда больших сил ударного характера, а при пологой характеристике – к их снижению за счет увеличения амплитуды упругих колебаний, распространяемых вдоль поезда. Для снижения продольных сил в поезде предложено использовать высокоэнергоемкие поглощающие аппараты, скорость нарастания силы в которых существенно зависит от скорости сжатия амортизатора.*

Ключевые слова: *модель поезда, поглощающий аппарат, силовая характеристика, продольная сила, маневровое соударение вагонов, однородный состав.*

Pavel A. Sakharov
Belarusian State University of Transport (BelSUT), Gomel, Belarus

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF DAMPING DEVICES FORCE CHARACTERISTICS ON THE FORCES BETWEEN TRAIN CARS

Abstract. *The paper considers the influence of the force characteristics of the damping apparatus on the value of the maximal longitudinal forces arising between the cars. Using the computer program MSC.ADAMS, we performed the simulation of shunting collisions of cars and train transient movement modes. The dependences of the maximal forces at cars' collision at various velocities on the shape of the elastic elements' force characteristics are determined. The operation of various shock dampers for the case of the train starting off electric braking and movement through the parts of the longitudinal track profile was estimated. It is shown that shock dampers with a rapidly growing line of load lead to the emergence and propagation of large shock forces along the train, while a slow growth of the force leads to their reduction due to the amplitude increase in elastic vibrations propagated along the train length . We propose to use high-energy-damping devices to reduce the longitudinal forces in the train, which are characterized by the force slew rate substantially depending on the compression velocity of the shock damper.*

Keywords: *train model, damping apparatus, force characteristic, longitudinal force, shunting collision of cars, uniform composition.*

Движение поездов связано с возникновением больших динамических сил между вагонами. Наибольших значений продольные силы достигают при переходных процессах в период трогания, торможения или движения по сложному профилю пути; они оказывают существенное влияние на устойчивость движения вагонов. Особенно актуален этот вопрос для тяжеловесного движения, тенденция к развитию которого прослеживается во всем мире [1].