

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-309-319

УДК 621.316.37.064.1

Оценка эффективности устройства ограничения тяжений проводов при коротком замыкании

И. И. Сергей¹⁾, Е. Г. Пономаренко¹⁾, Я. В. Потачиц¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Интенсивность электродинамического действия токов короткого замыкания (КЗ) на гибкие проводники воздушных линий зависит от величины токов КЗ. Ввод новых мощностей неизбежно сопровождается ростом токов КЗ в узлах энергосистемы, поэтому необходимость ограничения пиков тяжений, возникающих при КЗ, на определенном этапе развития энергосистемы может приобрести особую актуальность. При токах КЗ более 40 кА механические усилия и смещения проводов могут оказывать решающее влияние на конструктивное выполнение гибкой ошиновки как с одиночными проводами, так и с расщепленными фазами. В связи с этим возникла необходимость разработки и использования новых конструктивных элементов, повышающих электродинамическую стойкость гибких шин открытых распределительных устройств. Одним из таких элементов является демпфер тяжения. Демпфер устанавливается между порталом и гирляндой изоляторов и ограничивает передачу нежелательных усилий на порталы при коротких замыканиях. Разработан численный метод расчета динамики гибких проводников распределительных устройств и воздушных линий при коротком замыкании с учетом влияния демпферов тяжения. Данный метод был использован для модификации компьютерной программы расчета электродинамической стойкости. С помощью компьютерной программы показано, что установка демпфера тяжения позволяет срезать пики тяжений провода при коротком замыкании в начальной стадии движения проводников. Однако в пролетах большой длины после срабатывания демпфера возможно появление новых всплесков тяжения, обусловленных резкой остановкой провода.

Ключевые слова: энергетика, электродинамическая стойкость, демпфер тяжения

Для цитирования: Сергей, И. И. Оценка эффективности устройства ограничения тяжений проводов при коротком замыкании / И. И. Сергей, Е. Г. Пономаренко, Я. В. Потачиц // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 4. С. 309–319
DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-309-319

Evaluation of the Efficiency of the Device for Limiting Tension of the Wire in a Short Circuit

I. I. Sergey¹⁾, E. G. Panamarenka¹⁾, Ya. V. Potachits¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The intensity of the electrodynamic action of currents of a short circuit on the flexible conductors of overhead lines depends on the magnitude of currents of short-circuit. The commis-

Адрес для переписки

Пономаренко Евгений Геннадьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-71-63
ponomarenkoeg@bntu.by

Address for correspondence

Panamarenka Evgeniy G.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-71-63
ponomarenkoeg@bntu.by

sioning of new capacities is inevitably accompanied by an increase in short circuit currents in the nodes of the grid, so the need to limit peaks of tension arising in a short-circuit can acquire a special relevance at a certain stage of development of the power system. At short circuit currents over 40 kA the mechanical force and displacement of the wires can have a decisive influence on the structural performance of flexible bus as of single wires as well as of split phases. In this regard there is a need for the development and use of new structural elements enhancing electrodynamic stability of flexible busbars of outdoor switchgear. One such element is a tension damper. The damper is installed between the portal and the insulator string and limits the transmission of undesirable forces on the portals in a short circuit. The numerical method of calculation of dynamics of flexible wires of switchgear and overhead lines in a short-circuit taking into account influence of a tension damper has been developed. This method was used for modification of the computer program of calculation of electrodynamic stability. With the aid of the computer program it was demonstrated that the installation of the tension damper makes it possible to cut off peaks of the tension of wire in a short circuit at the initial stage of movement of the conductors. However, in spans of a great length after the actuation of the damper the occurrence of new bursts of tension is possible due to the sudden stop of the wire.

Keywords: power engineering, electrodynamic stability, damper of tension

For citation: Sergey I. I., Panamarenka E. G., Potachits Ya. V. (2017) Evaluation of the Efficiency of the Device for Limiting Tension of the Wire in a Short Circuit. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (4), 309–319. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-309-319 (in Russian)

Введение

Электродинамическое действие больших токов короткого замыкания вызывает колебания гибких проводников со значительной амплитудой, что приводит к возрастанию тяжения проводников и сопровождается ударными динамическими нагрузками, действующими на провода, изоляционные и опорные конструкции воздушных линий (ВЛ) и распределительных устройств (РУ). Такие нагрузки могут вызвать нарушение механической прочности элементов ВЛ и РУ. По условию электродинамической стойкости максимальные тяжения проводов при КЗ не должны превышать их допустимых значений [1]. Допустимые тяжения определяются пределом механической прочности проводов, изоляционных и опорных конструкций.

Интенсивность электродинамического действия токов КЗ на гибкие проводники ВЛ зависит от величины токов КЗ. Ввод новых мощностей неизбежно сопровождается ростом токов КЗ в узлах энергосистемы, поэтому необходимость ограничения пиков тяжений, возникающих при КЗ, на определенном этапе развития энергосистемы может приобрести особую актуальность. Необходимость ограничения максимальных тяжений проводов при КЗ подтверждается уже появившимися публикациями патентов на ограничители тяжения [2] и предложениями фирм – производителей этих устройств [3].

Основная часть

В материалах фирмы Israel Electric Corporation [1] описан патент на ограничитель тяжений (демпфер), который, по утверждению авторов, эффективно ограничивает (на 20 % и более) пики тяжений проводов при КЗ.

Демпфер тяжений устанавливается между траверсой опоры (портала) и гирляндой изоляторов и ограничивает передачу нежелательных усилий на опорные конструкции при КЗ. Конструкция демпфера и принципиаль-

ная схема стадий его работы представлены на рис. 1 [2]. Существуют и другие модификации демпферов тяжения. Например, в [3] описано устройство контроля натяжения провода, которое отличается от конструкции на рис. 1 наличием ограничителя хода.

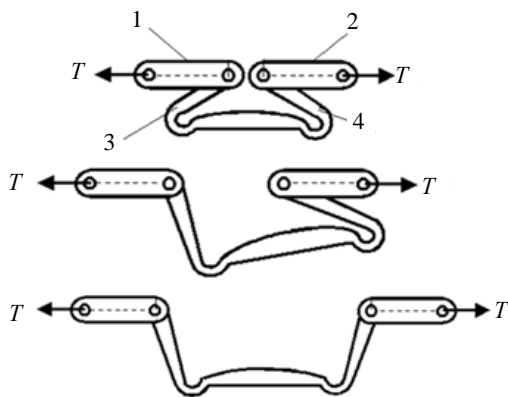


Рис. 1. Принципиальная схема работы демпфера тяжения

Fig.1. The schematic diagram of operation of the damper of tension

Как видно из рис. 1, под действием натяжения провода за счет пластической деформации происходят разгибание демпфера в месте соединения звена 3 с основанием демпфера и поворот звена 3 относительно оси шарнирного крепления к звену 1. Звенья 2 и 4 при этом находятся в исходном положении за счет их большей жесткости. После достижения предельного положения звеном 3 угол между ним и звеном 1 фиксируется и в дальнейшем не меняется. На заключительном этапе работы демпфера происходит поворот звеньев 2 и 4 аналогично звеньям 1 и 3.

Производители устройств для контроля натяжения провода (демпферов) рекомендуют также использование этих устройств для снижения статических нагрузок от гололеда, налипания снега, поваленных деревьев [3]. В данном случае снижение нагрузки при срабатывании демпфера происходит плавно и не сопряжено с колебаниями проводников. Устройства зарекомендовали себя как простые и надежные в эксплуатации средства защиты линий от повышенных механических напряжений.

В случае же КЗ увеличение нагрузки на опоры происходит из-за колебаний проводников с большой амплитудой. Работа демпфера в таких условиях еще не изучена, и эффективность его применения при КЗ требует дополнительной оценки. Поэтому задачей исследования являлась оценка возможности применения демпферов для ограничения максимальных тяжений гибких проводов при КЗ. Для решения указанной задачи была составлена упрощенная расчетная схема ограничителя тяжений, в которой он представлен пружиной с жесткостью C_x , соответствующей жесткости демпфера (рис. 2).

Расчетная схема фрагмента пролета с гибкими проводниками, в котором установлен демпфер тяжения, представлена на рис. 3.

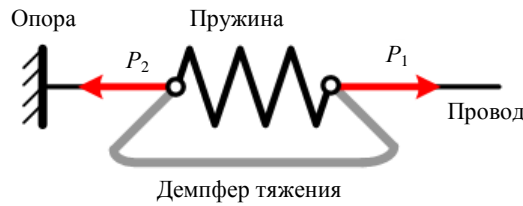


Рис. 2. Расчетная схема для математического моделирования динамики демпфера (P_1, P_2 – силы, действующие на демпфер тяжения)

Fig. 2. The settlement scheme for mathematical modelling of dynamics of the damper (P_1, P_2 – forces operating on the damper of tension)

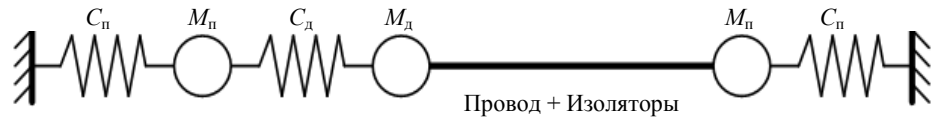


Рис. 3. Расчетная схема фрагмента пролета с гибкими проводниками и демпфером:
 $C_{п}$ – упругая жесткость портала; $C_{д}$ – упругая жесткость демпфера;
 $M_{п}$ – приведенная масса портала; $M_{д}$ – масса демпфера

Fig. 3. The settlement scheme of a fragment of a span with flexible conductors and the damper:
 $C_{п}$ – elastic stiffness of the portal; $C_{д}$ – elastic stiffness of the damper;
 $M_{п}$ – the specified mass of the portal; $M_{д}$ – mass of the damper

На основе схемы, представленной на рис. 3, составлена математическая модель расчета. В ней проводники и натяжные гирлянды изоляторов (при их наличии) представляются гибкими упругими нитями, для которых уравнения их движения при КЗ записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial S} \left(T \frac{\partial \bar{R}}{\partial S} \right) + \bar{P} = \rho \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2} \frac{1}{2}, \quad (1)$$

где S – дуговая координата по длине провода, м; t – время, с; \bar{R} – радиус-вектор, определяющий пространственное положение проводов, м; T – модуль тяжения, Н; \bar{P} – вектор суммарного усилия, действующего на единицу длины провода, Н; ρ – масса единицы длины провода (или гирлянд изоляторов), кг/м.

Математическое описание динамики порталов и демпфера тяжения при КЗ производится обыкновенными нелинейными дифференциальными уравнениями первого порядка

$$M_{д} \frac{d^2 x}{dt^2} + C_x x + f_{д} \frac{dx}{dt} = T_{дин}, \quad (2)$$

где C_x – линейная упругая жесткость демпфера, Н/м; x – координата вдоль пролета, м; $f_{д}$ – линейная вязкостная жесткость демпфера, кг/с; $T_{дин}$ – мгновенное значение тяжения провода, Н.

Как показано в [4], демпфирующие свойства элементов токоведущих конструкций в целом позволяют заметно снизить максимальные тяжения проводов. Однако упругие деформации элементов пролета могут приводить к увеличению его длины, а соответственно к увеличению провеса проводов и недопустимому сближению или даже схлестыванию фазных проводников между собой. Поэтому выбор оптимальных параметров демпферов тяжений является задачей исследования. Жесткость демпфера C_x должна быть меньше по величине, чем упругая жесткость провода или портала, которые служат верхней границей искомой жесткости ограничителя тяжений.

Совместное решение (1) и (2) позволяет оценить влияние упругой податливости демпфера на величину тяжений и возможное уменьшение междуфазных расстояний в процессе колебаний проводников. С помощью разработанной математической модели проведена оценка возможности применения демпфера для уменьшения пиков тяжений.

Система уравнений (1) и (2) решается численным методом, использование которого применительно к гибким токоведущим конструкциям обособовано в [4] и [5]. Разработанный численный алгоритм расчета динамики проводников с учетом демпфера тяжений был применен для модификации компьютерной программы LINEDYS+ [6]. С ее помощью для подтверждения эффективности использования демпфера тяжений проведены расчеты при КЗ для типового пролета открытого распределительного устройства (ОРУ) 110 кВ длиной 27 м, результаты которых представлены на рис. 4, 5.

Как видно из рис. 4, установка демпферов позволяет уменьшить пик тяжения при отклонении проводников $T_{2\max}$ на 13 % и пик при падении $T_{3\max}$ на 24 %.

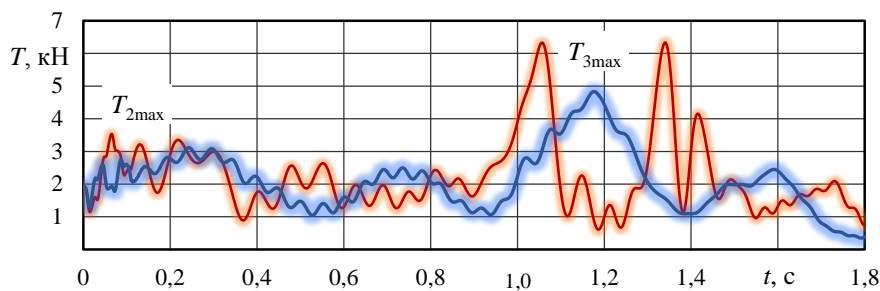


Рис. 4. Тяжения в проводниках при коротких замыканиях:

— жесткое крепление проводов; — с демпфером

Fig. 4. Tension in the conductors in a short-circuit:

— rigid attachment of wires; — with the damper

В то же время срабатывание демпфера тяжений сопровождается увеличением размаха горизонтальных колебаний проводников в обе стороны от их начального положения $y_{1\max} + y_{2\max}$, что может привести к недопустимому сближению проводников соседних фаз. В расчетном случае (рис. 5) увеличение размаха колебаний составило 7 % и сближение соседних проводников не превысило допустимых значений.

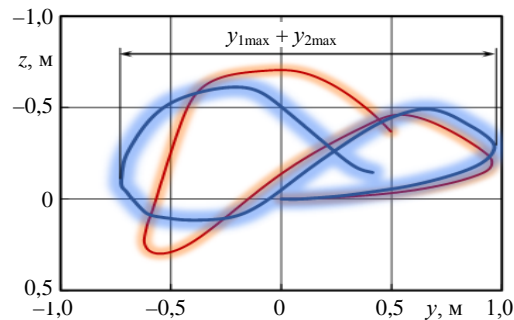


Рис. 5. Траектория движения проводов:

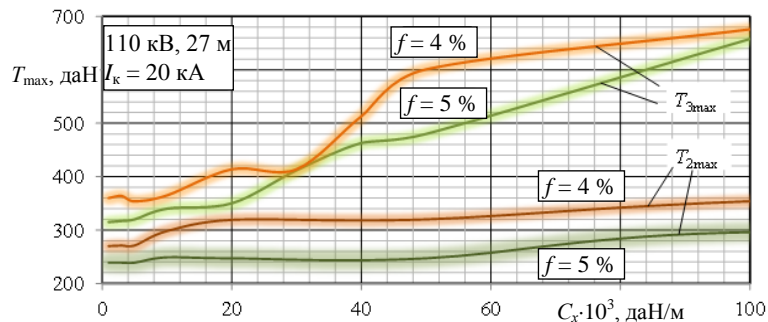
— жесткое крепление проводов; — с демпфером

Fig. 5. Trajectories of the movement of wires:

— rigid attachment of wires; — with the damper

Подобные результаты имеют место для других классов напряжения, длины и марки провода. Тяжения в проводах и размах их колебаний в итоге будут определяться жесткостью установленного демпфера C_x . Жесткость демпфера, таким образом, должна иметь некоторое оптимальное значение, при котором существенно уменьшаются динамические тяжения и в то же время отклонения не превысят допустимых значений. Для определения оптимума C_x был проведен ряд расчетов для типовых пролетов РУ 110–220 кВ в различных режимах КЗ с учетом начальных условий. Расчеты выполнены при продолжительности КЗ, равной 0,1 с, в расчете на срабатывание основной быстродействующей защиты без выдержки времени.

Расчетную жесткость демпфера тяжения принимали в диапазоне $(1-100) \cdot 10^3$ даН/м. За ориентир брали измеренную жесткость portalной конструкции в габаритах ОРУ 110 кВ в опыте LABORELEC, равную $64 \cdot 10^3$ даН/м [7]. В указанном диапазоне произвели расчет максимальных тяжений проводников при КЗ на стадии их отталкивания T_{2max} и падения T_{3max} , результаты которого представлены на рис. 6. Из графика видно, что с повышением жесткости демпфера увеличиваются и максимальные тяжения. Уровень тяжений на стадии падения провода несколько выше, чем на стадии отталкивания.

Рис. 6. Тяжения T_{2max} при коротком замыканииFig. 6. Tension T_{2max} in a short-circuit

Анализ расчетных диаграмм тяжений показывает, что с уменьшением жесткости демпфера усиливается эффект среза пиков тяжений. Однако, если говорить об электродинамической стойкости в целом, необходимо учесть еще один показатель – минимальные междуфазные расстояния a_{\min} при колебаниях проводников [8].

В выбранном диапазоне изменения C_x произвели расчет сближений проводников при КЗ. Зависимости максимальных сближений на стадии свободного движения от параметра C_x представлены на рис. 7. Из графиков видно, что зависимость $a_{\min} = f(C_x)$ имеет максимум при изменении C_x в диапазоне $(15-35) \cdot 10^3$ даН/м. Эти значения могут служить ориентиром для выбора рабочей жесткости демпфера, так как максимальные тяжения в данном диапазоне еще не достигли своих пиков и составляют только 50–75 % от аналогичных величин при жестком креплении проводников (без демпфера).

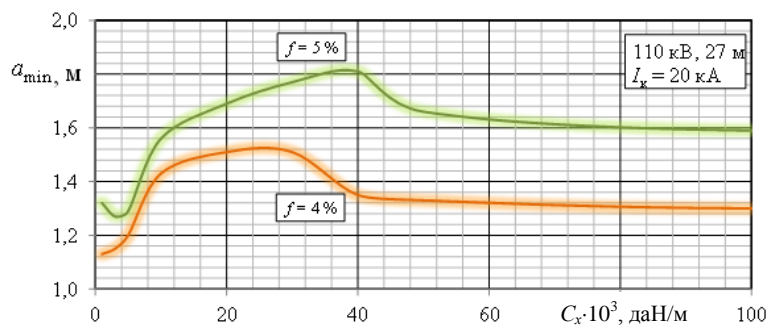


Рис. 7. Минимальные междуфазные расстояния a_{\min} при коротком замыкании
Fig. 7. The minimum interphase distances a_{\min} in a short-circuit

На основе проведенного вычислительного эксперимента можно сделать вывод, что при выборе параметров демпфера необходимо учитывать его влияние как на срез тяжений, так и на сближение проводников. Выбор демпфера с минимальной жесткостью не обеспечивает автоматически электродинамическую стойкость пролета [9].

В процессе исследований модель демпфера была усовершенствована с учетом реальных характеристик его срабатывания. Использовали модель пружины, которая в нормальном режиме работы (до КЗ) имеет большую жесткость и практически не деформируется. После возникновения КЗ проводники начинают двигаться под воздействием электродинамических усилий, при этом возрастают тяжения и нагрузки на опоры и демпферы. При достижении нагрузки в $(1,6-2,1)f$ [3] (f – номинальная нагрузка демпфера по справочным данным) происходит срабатывание демпфера. В алгоритме программы этот момент учитывается резким уменьшением жесткости пружины, что позволяет демпферу начать удлинение. Если в процессе КЗ удлинение D достигает конечной величины, обусловленной конструкцией устройства, то пружина снова приобретает большую жесткость и процесс деформации практически прекращается.

К компьютерной программе LINEDYS+ создана база данных с параметрами устройств контроля натяжения, что позволяет путем проведения серий расчетов подобрать оптимальное решение по выбору параметров демпфера. Выполнено исследование эффективности применения демпферов для ограничения пиков тяжений при коротком замыкании. Для этого в экспериментальном пролете 330 кВ проведены расчеты динамики гибких проводников при КЗ с демпфером и без него. Результаты расчета представлены на рис. 8, 9.

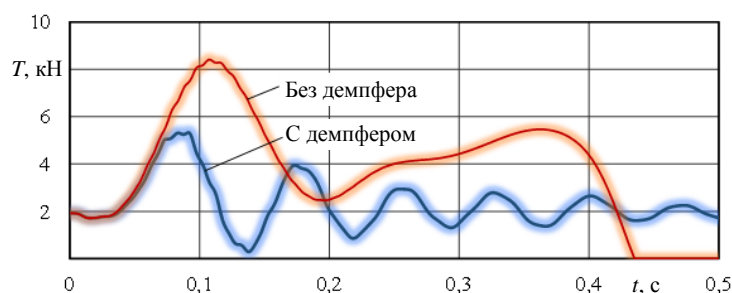


Рис. 8. Расчет тяжения в пролете с установкой демпфера и без него: пролет 330 кВ; длина пролета 48 м; ток короткого замыкания 30 кА

Fig. 8. Calculation of a tension in a span with installation of the damper and without the damper: the span is of 330 kV; the span length is 48 m; the current of a short-circuit is 30 kA

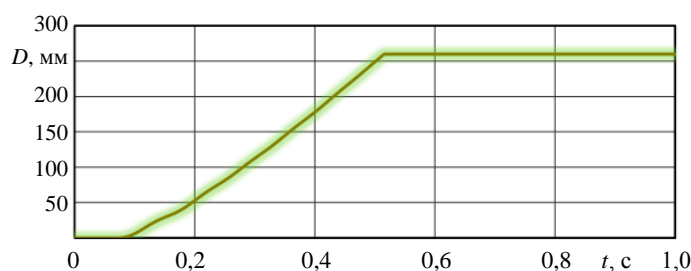


Рис. 9. Удлинение демпфера при коротком замыкании

Fig. 9. Lengthening of the damper in a short-circuit

На рис. 8 представлена диаграмма тяжений в пролете с установленным демпфером и без него. Результаты эксперимента показали, что пик тяжений при установке демпфера уменьшился на 40 % для данного пролета при токе КЗ, равном 30 кА. Процесс удлинения демпфера до своей предельной величины $D = 260$ мм отражен на рис. 9. Демпфер сработал при достижении тяжения в 5 кН, что близко к величине $2f$ для выбранного устройства, и дальнейший рост тяжения практически прекратился (рис. 9).

Анализируя приведенные диаграммы, можно сделать вывод об эффективности демпфера при КЗ и возможности снижения с его помощью первого пика тяжения, а соответственно и нагрузок на опорные конструкции. Также для типового пролета ОРУ 330 кВ длиной 48 м были выполнены исследования влияния параметра D на величину среза первого пика тяжения.

В расчетах использовали демпферы с удлинением D , равным 260, 390 и 520 мм [3]. Ток КЗ изменяли в пределах 20–50 кА. Во всех расчетных случаях срез тяжений был одинаков, что объясняется достижением пика тяжения еще до момента удлинения демпфера до предельной величины. Как видно из рис. 10, пик тяжения (около 5 кН) достигается за 0,09 с, а максимальное удлинение демпфера – через 0,50 с. Это характерно для сравнительно коротких пролетов. Следовательно, в таких случаях достаточно установки демпфера с наименьшим удлинением D .

Расчеты в пролете длиной 150 м (характерно для линий электропередачи) с установкой более мощного демпфера при $D = 260$ (390; 520) мм показали аналогичные результаты, как и для короткого пролета. Однако в длинных пролетах после достижения максимальной вытяжки демпфера возникает дополнительный пик тяжения $T_{\text{ост}}$ от резкой остановки движения провода (рис. 10). Момент возникновения $T_{\text{ост}}$ соответствует моменту максимального удлинения демпфера. Чем более массивным будет провод и чем больше ток КЗ, тем дополнительный пик тяжения больше.

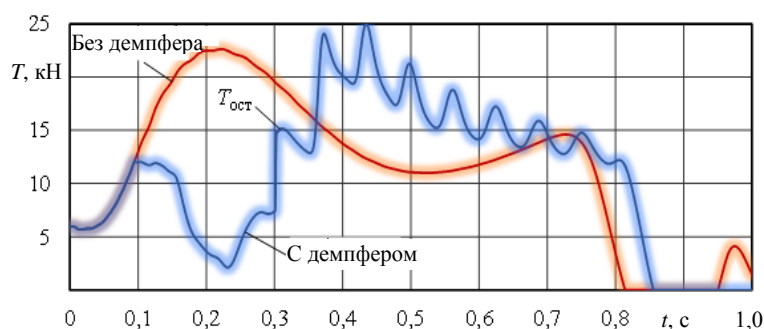


Рис. 10. Дополнительный пик тяжения $T_{\text{ост}}$ после срабатывания демпфера в пролете длиной 150 м

Fig. 10. Additional peak of a tension $T_{\text{ост}}$ after the operation of the damper in a span of 150 m long

Из рис. 10 видно, что пик тяжения от резкой остановки $T_{\text{ост}}$ провода приводит к появлению колебаний провода с повышенной частотой и в итоге вызывает всплески тяжения, которых при отсутствии демпфера не наблюдалось. Для анализа влияния рабочей длины демпфера D на величину дополнительного пика $T_{\text{ост}}$ и последующих пиков тяжений провели расчеты в пролете длиной 150 м при $D = 260$ (390; 520) мм (рис. 11). Из диаграммы на рис. 11 видно, что изменение длины D практически не влияет на величину максимумов тяжения T_{max} , а лишь изменяет момент их наступления.

Как отмечалось выше, при использовании демпфера будет изменяться не только тяжение, но и провес провода в пролете из-за удлинения демпфера, что предположительно должно привести к уменьшению междуфазных расстояний $a_{\text{ф-ф}}$ при движении гибких проводников.

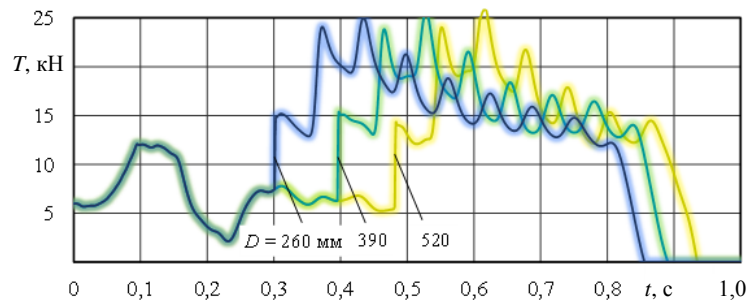


Рис. 11. Зависимость тяжения от удлинения демпфера

Fig. 11. Dependence of a tension on lengthening of the damper

Для оценки влияния удлинения демпфера D на величину $a_{\phi-\phi_{\min}}$ провели расчеты для пролета длиной 48 м при токе КЗ 30 кА, результаты которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость междуфазных расстояний $a_{\phi-\phi_{\min}}$ от удлинения демпфера D

Dependence of the interphase distances $a_{\phi-\phi_{\min}}$ on lengthening of the damper D

D , мм	0	260	390	520
$a_{\phi-\phi_{\min}}$, м	1,65	1,26	0	0
T_{\max} , кН	17,2	12,0	10,3	10,3

По информации производителей, установка устройств контроля натяжения (демпферов) в пролетах ОРУ или ЛЭП эффективна как средство снижения статических нагрузок. Однако, анализируя приведенные выше диаграммы и табл. 1, можно сделать вывод, что применение их в качестве демпферов при КЗ не всегда эффективно из-за возможности увеличения тяжений и риска недопустимого сближения проводников [10].

ВЫВОДЫ

1. Разработан численный метод расчета динамики гибких проводников распределительных устройств и воздушных линий при коротком замыкании с учетом влияния демпферов тяжения. Данный метод был применен для модификации компьютерной программы расчета электродинамической стойкости.

2. С помощью компьютерной программы показано, что установка демпфера тяжения позволяет срезать пики тяжений провода при коротком замыкании в начальной стадии движения проводников. Однако в пролетах большой длины после срабатывания демпфера возможно появление новых всплесков тяжения, обусловленных резкой остановкой провода.

3. Согласно расчетам, срабатывание демпфера при коротком замыкании приводит к увеличению провеса проводов и тем самым повышает риск недопустимого сближения проводников соседних фаз.

4. Анализ проведенных исследований показал, что устройства ограничения тяжения не всегда эффективны при коротком замыкании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания: ГОСТ 30323–95. Введ. 01.03.1999. Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. 57 с.
2. Flexible Conductor with a Mechanical Device for Short-Circuit Overloading Prevention [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.niivn.dn.ua/prmi.htm>. Дата доступа: 17.02.2015.
3. Защита воздушных распределительных линий от механических перегрузок [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://sicame.com.ua/pdf/DAC_OMEGA_2011.pdf. Дата доступа: 02.02.2017.
4. Сергей, И. И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И. И. Сергей, М. И. Стрелюк. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. 252 с.
5. Пономаренко, Е. Г. Методы расчета и анализ электродинамической стойкости токоведущих конструкций с гибкими проводниками / Е. Г. Пономаренко. Минск, 2010. 151 с.
6. Разработка компьютерной программы расчета и проведение оценки электродинамической стойкости воздушных линий ОАО «МОЭСК» при росте уровней токов КЗ: отчет о НИР (закл.) / БНТУ, рук. И. И. Сергей. Минск, 2013. 73 с. Э-13-01 (962/13 кр).
7. The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open-Air Substations (Rigid or Flexible Bus-Bars). Paris, 1996. 90 p. (Preprint / CIGRE; Brochure No 105. Working Group 23–11, SC 23).
8. Игнатов, В. В. К вопросу о методах ограничений токов короткого замыкания в энергосистеме / В. В. Игнатов, М. Ш. Миерихаймов, А. В. Шунтов // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 5. С. 94–103.
9. Horowitz, S. H. Power System Relaying / S. H. Horowitz, A. G. Phadke, J. K. Niemira. Fourth ed. John Wiley & Sons Inc., 2014. 400 с.
10. Александров, Г. Н. Движение проводов расщепленной фазы воздушной линии при коротких замыканиях / Г. Н. Александров, И. П. Щеглов, И. Ф. Половой // Электричество. 1980. № 6. С. 12–18.

Поступила 05.04.2017 Подписана в печать 08.06.2017 Опубликовано онлайн 28.07.2017

REFERENCES

1. State Standard 30323–95. Short-Circuits in Electroinstallations: Methods of Calculation of Electrodynamical and Thermal Action of Currents of a Short-Circuit. Minsk. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 1999. 57 (in Russian).
2. Flexible Conductor with a Mechanical Device for Short-Circuit Overloading Prevention. Available at: <http://www.niivn.dn.ua/prmi.htm> (Accessed 17 February 2015).
3. Protection of Air Overhead Distributive Lines against Mechanical Overloads. Available at: http://sicame.com.ua/pdf/DAC_OMEGA_2011.pdf (Accessed 2 February 2015) (in Russian).
4. Sergey I. I., Strelyuk M. I. (1999) *Dynamics of Wires of Electroinstallations of Power Supply Systems in a Short Circuit: Theory and Computing Experiment*. Minsk, VUZ-Yuniti. 252 (in Russian).
5. Panamarenka E. G. (2010) *Methods of Calculation and the Analysis of Electrodynamical Stability of Current-Carrying Constructions with Flexible Conductors*. Minsk, 151 (in Russian).
6. Sergey I. I. (2013) *Development of the Computer Program of Calculation and Evaluating Electrodynamical Stability of Overhead Lines of the "MOESK" JSC under the Growth of Levels of Short Circuit Currents* (Э-13-01 (962/13 кр)). Minsk, BNTU. 73 (in Russian).
7. CIGRE Study Committee 23 (Substations), Working Group 23–11 (1996). *The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open-Air Substations (Rigid or Flexible Bus-Bars)*. Paris, CIGRE, (105), 90.
8. Ignatov V. V., Mierikhaimov M. Sh., Shuntov A. B. (2009). Towards a Problem of Methods of Restrictions of Currents of a Short-Circuit in a Power Supply System. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Energetika* = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering, (5), 94–103 (in Russian).
9. Horowitz S. H., Phadke A. G., Niemira J. K. (2014) *Power System Relaying*. Fourth ed. John Wiley & Sons Inc. 400. DOI: 10.1002/9780470758786.
10. Alexandrov G. N., Shcheglov I. P., Polovoi I. F. (1980) The Movement of the Split Phase Wires of an Overhead Lines in a Short Circuit. *Electrichestvo* = Electricity, (6), 12–18 (in Russian).

Received: 5 April 2017

Accepted: 8 June 2017

Published online: 28 July 2017