

УДК 621.311.

И.В. Пантелеева

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТИ С ГИБКИМИ ПРОВОДНИКАМИ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ СИСТЕМЫ

Материалы статьи посвящены некоторым аспектам влияния токов короткого замыкания (к.з.) на электрическую сеть, особенно их электродинамическое и термическое воздействие. Обычно в расчете токов к.з. не учитывают нелинейность исследуемой системы. Возникает необходимость учета взаимного влияния таких факторов и создания комплексной математической модели расчета нелинейности, например, в системах с гибкими проводниками.

**Ключевые слова:** ток короткого замыкания, электрическая сеть, нелинейность, математическая модель, гибкий проводник, воздушная линия, электрическая дуга.

### Введение

**Постановка проблемы и анализ публикаций.** При расчетах токов к.з. и электродинамической стойкости. Так, расчет электродинамической стойкости гибких проводников выполняют при условиях металлического к.з. без учета переходного сопротивления в месте повреждения [1, 2].

Однако, опыт эксплуатации показывает, что большинство повреждений на ВЛ сопровождается электрическими дугами с изменяющимися во времени параметрами. Значительные токи к.з. вызывают смещения гибких проводников в пространстве. В результате изменяется длина дуги и ее параметры, а также среднегеометрическое расстояние между проводами, что приводит к увеличению или уменьшению индуктивного сопротивления ВЛ прямой и обратной последовательностей. При затянувшихся к.з. проявляется действие теплового спада тока к.з., которое определяется увеличением активного сопротивления проводов при нагревании их этим током.

Следует отметить, что вышеуказанные явления во время к.з. оказывают взаимное влияние, и учет их необходим также:

- при усовершенствовании устройств релейной защиты;
- при разработке устройств определения мест повреждения в электрических сетях,
- при анализе газодинамических процессов дуговых к.з. для локализации электрической дуги и разработке дуговых защит, а также в целях оценки динамической устойчивости электрической системы [3].

С учетом взаимного влияния указанных факторов во времени есть, необходимость разработки комплексной математической модели.

**Целью статьи** является разработка комплексной математической модели расчета нелинейности в системах с гибкими проводниками.

### Основной материал

Такая математическая модель должна представлять собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих следующие явления при к.з.:

- процесс развития открытой электрической дуги;
- перемещение гибких проводников в пространстве под действием электродинамических сил;
- увеличение активного сопротивления проводов при нагревании их током к.з.;
- увеличение или уменьшение индуктивного сопротивления прямой и обратной последовательностей ВЛ вследствие смещения проводов;
- увеличение длины проводов ВЛ вследствие их нагрева (температурное удлинение).

При разработке математической модели открытой электрической дуги было принято, что столб дуги, массой, равной нулю, имеющий форму окружности, двигается (удлиняется) с результирующей скоростью под действием следующих сил: электродинамических сил взаимодействия тока в дуге с окружающим ее магнитным полем; силы воздействия собственных тепловых потоков; силы сопротивления воздуха движению газового столба дуги; силы воздействия ветра. При этом учитывалось также изменение длины дуги в результате смещения проводов.

В соответствии с [4], открытая электрическая дуга представляется прямоугольной характеристикой ( $U = U_d = \text{sign} i$ ), а ее активное сопротивление для определенного момента времени определяется по формуле [5]:

$$R_d(t) = 1,05 \cdot l_d(t) / I_d(t), \quad (1)$$

где  $l_d(t)$  - длина дуги, м;  $I_d(t)$  - действующее значение тока в дуге, кА.

Изменение длины дуги во времени для ее формы в виде окружности может быть описано следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dl_d}{dt} = 16 \cdot \vartheta_d(t) \cdot t / 3 \sqrt{a^2(t) + 4(\vartheta_d(t) \cdot t)^2}, \quad (2)$$

где  $\vartheta_d(t)$  – результирующая скорость движения (удлинения) открытой дуги под действием основных сил (электродинамических сил взаимодействия тока в дуге с окружающим ее магнитным полем), силы воздействия собственных тепловых потоков и силы воздействия ветра);  $a(t)$  – междуфазное расстояние (м), изменяющееся при перемещении проводников;  $a(t) = a + 2 \cdot s(t)$  при противоположном направлении токов в фазных проводниках;  $a(t) = a - 2 \cdot s(t)$  при одинаковом направлении тока в проводниках;  $a$  – начальное междуфазное расстояние между проводниками;  $s(t)$  – смещение проводников (м) под действием электродинамических сил при к.з.

Результирующая скорость движения дуги :

$$v_d(t) = 0,412 \times \sqrt[3]{I_d(t) \cdot H(t) / [1 + 0,4 \cdot H^{0,3}(t)]^2} + v_{T.П.} + v_B. \quad (3)$$

Здесь первое слагаемое в правой части описывает скорость движения дугового столба в виде твердого проводника в магнитном поле. Такое допущение подтверждают результаты исследований, показывающие, что вследствие высокой температуры в столбе проникновение газа через него затруднено, о чем говорит повышение давления впереди движущейся дуги и некоторое разрежение позади нее ( $H(t)$  – напряженность магнитного поля). Второе слагаемое,  $v_{T.П.}$ , это скорость подъема дуги, увлекаемой собственным тепловым потоком, значения которой принимаются в соответствии с известными данными. И, наконец,  $v_B$  – скорость ветра, которая носит вероятностный характер. Мгновенное значение горизонтальной скорости ветра в приземном слое воздуха представляют как сумму средней скорости (за данный интервал времени)  $\underline{V}$  и составляющей, обусловленной флуктуациями  $v_B(t)$  :

$$v_B(t) = \underline{V} + v(t). \quad (4)$$

Средняя скорость  $\underline{V}$  зависит от высоты над землей, состояния поверхности земли и других факторов. Статистические свойства переменной составляющей  $v(t)$  можно считать практически неизменными. Учитывая достаточно большой масштаб турбулентности ветра, его скорость по фронту (в пределах пролета линии) может быть принята одинаковой в соответствии с картой районирования территории страны по скоростям ветра с повторяемостью 1 раз в 5, 10 и 15 лет. Максимальные нормативные скорости ветра определяют исходя из повторяемости 1 раз в 15 лет для ОРУ 500 кВ и 1 раз в 10 лет для ОРУ 6-330 кВ. При этом на высоте до 15 м нормативная скорость не должна быть ниже 30 м/с в ОРУ 500 кВ и 25 м/с в ОРУ 6-330 кВ.

При расчете горизонтальных смещений проводников  $s(t)$  использована общепринятая модель проводников в пролете гибкой шинной линии в виде абсолютно жесткого стержня с осью, очерченной по цепной линии. Гирлянды изоляторов введены в модель в виде жестких стержней, шарнирно соединенных с проводниками и опорами.

Электродинамические силы, действующие на провод при к.з., отождествляются с электродинамическими силами, действующими между параллельными бесконечно длинными проводниками, проходящими через центры масс гибких проводников.

В качестве расчетной схемы движения проводников принята совокупность двойных маятников, а их движение описывается уравнениями Лагранжа.

При исследованиях рассматривались линии, у которых длины гирлянд на опорах были значительно меньше длин пролетов. Это позволило перейти без больших погрешностей от расчетной модели в виде двойного физического маятника к модели в виде одинарного физического маятника.

Уравнение для одного проводника линии в пролете без учета гирлянд при двухфазном к.з. [2]:

$$\frac{d\alpha^2}{dt^2} = \left[ -\sin \alpha + \frac{F_t^{(2)}}{m \cdot g} \right] \cdot \frac{\cos \alpha}{1 + 2 \cdot L \cdot \sin \alpha / \alpha} \times \quad (5)$$

$$\times 2\pi \sqrt{2f / 3g},$$

где  $\alpha$  – угол отклонения проводника от равновесного положения при движении;  $mg$  – вес проводника в пролете;  $m$  – масса проводника в пролете;  $f$  – провес проводника посередине пролета,  $m$ ;  $F_t^{(2)}$  – электродинамическая сила, действующая на провод при к.з.

В случае трехфазного к.з. для проводов, расположенных на одном уровне без гирлянд, составлено аналогичное уравнение [1]. Горизонтальные смещения проводников определяют по выражению:

$$s(t) = f \cdot \sin \alpha, \quad (6)$$

где угол  $\alpha$  определяется решением уравнения (5).

Среднее смещение определенной длины (между анкерными опорами ВЛ) рассчитывалось путем введения приближенного коэффициента (0,7-0,8), учитывающего неравномерность смещения проводов по длине между отдельными пролетами ВЛ вследствие влияния подвеса проводов на гирляндах изоляторов. Учет теплового спада тока к.з. выполняется с помощью коэффициента, определяющего увеличение активного сопротивления проводников при их нагреве током к.з. Расчет температуры нагрева проводников при к.з. ведется с помощью уравнения нагрева однородного проводника при адиабатическом процессе, преобразованного к виду:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{I_{Пт} \cdot \rho_v}{s_l^2 \cdot \lambda \cdot c_0 [1 + \beta / \alpha \cdot \rho_0 \cdot (\rho_v - \rho_0)]}, \quad (7)$$

где  $\rho_v$  и  $\rho_0$  – удельные сопротивления (Ом/мм<sup>2</sup>) материала проводника при температуре  $\vartheta$  и при

начальной нормированной температуре  $\vartheta_0$ ;  $s_1$  - сечение проводника, мм<sup>2</sup>;  $\lambda$  - удельный вес, кг/м<sup>3</sup>;  $c_0$  - удельная теплоемкость материала проводника при температуре  $\nu_0$ , Дж/кг·К;  $\beta$  - температурный коэффициент теплоемкости, 1/К;  $\alpha$  - температурный коэффициент удельного сопротивления, 1/К.

Изменение удельного сопротивления материала проводника при повышении температуры:

$$\rho_{\nu} = \rho_0 \cdot (\tau_p + \vartheta) / (\tau_p + \vartheta_0) = \rho_0 \cdot k_{\nu}, \quad (8)$$

где  $\tau_p$  - условные температуры, равные для меди  $\tau_p = 234^{\circ}\text{C}$ , для алюминия  $\tau_p = 236^{\circ}\text{C}$ ;  $k_{\nu}$  - коэффициент увеличения активного сопротивления проводника при к.з. Расчет индуктивного сопротивления ВЛ прямой и обратной последовательностей выполняется по известной формуле с учетом изменения во времени среднегеометрического расстояния между проводами:

$$x_L(t) = 0,144 \lg(1,26[a + s(t)]/r_{\Pi}), \quad (9)$$

где  $r_{\Pi}$  - радиус сечения проводника, м.

Температурное удлинение проводников ВЛ определяется по формуле:

$$l_{\nu} = l_0 \cdot \left[ 1 + a_{l_{cp}} \cdot (\vartheta - \vartheta_0) \right], \quad (10)$$

где  $l_0$  - начальная длина проводника при температуре  $\vartheta_0$ ;  $a_{l_{cp}}$  - средний коэффициент температурного удлинения, 1<sup>0</sup>/С.

Периодическая составляющая тока двухфазного к.з. в произвольный момент времени с учетом изменения во времени параметров нелинейных элементов короткозамкнутой цепи определяется как

$$I_{\Pi}^{(2)} = U / 2 \sqrt{\left[ x_C + x_L(t) \cdot l_{\nu} \right]^2 + \left[ R_C + R_D(t) + R_L \cdot k_{\nu} \cdot l_{\nu} \right]^2}, \quad (11)$$

где  $U$  - напряжение ВЛ, кВ;  $l_{\nu}$  - длина линии, км.

На основании изложенного выше алгоритма была разработана программа, позволяющая выполнять расчеты переходных процессов в системе с гибкими проводниками. Программа предусматривает расчет параметров открытой электрической дуги ( $R_D(t)$ ,  $I_D(t)$ ,  $I_{D'}(t)$ ), развивающейся при различных условиях к.з. (вид к.з., начальное значение периодической составляющей тока к.з. и др.); расчет смещения и тяжения гибких проводников во время к.з. на ВЛ и в распределительных устройствах с гибкой ошиновкой; расчет коэффициента увеличения активного сопротивления проводников при к.з.; расчет индуктивного сопротивления ВЛ прямой и обратной последовательностей и температурное удлинение проводников ВЛ.

Расчет параметров системы гибких проводников выполняется при условии металлического или дугового к.з. Причем начальный момент появления

дугового к.з. моделируется в зависимости от принятых расчетных условий, характеризующих причины образования дугового замыкания. Так, при набросах проводников или при замыкании фаз ВЛ через металлические предметы начальный момент появления дуги моделируется металлическим к.з., переходящим в дуговое к.з. При газовом разряде, пробоях или перекрытиях изоляции - дуговым к.з.

Система дифференциальных уравнений (2), (5), (7), описывающая переходные процессы в системе с гибкими проводниками, решается методом Рунге-Кутты. Погрешность математической модели, полученная на базе данных по каждой составляющей модели, не превосходит допустимую (10%).

Исследования влияния открытой электрической дуги на ток к.з., на смещение и тяжение гибких проводников, а также изменения активного и индуктивного сопротивлений при к.з. выполнены для ВЛ напряжением 10, 35, 110, 220, 330 и 500 кВ.

Учет совместного влияния открытой электрической дуги и изменения активного и индуктивного сопротивлений проводов ВЛ повышает точность оценки электродинамической стойкости короткозамкнутых проводов во времени по сравнению с оценками, не учитывающими динамику изменения токов к.з. Влияние указанных факторов в целом проявляется в замедлении роста смещения. При значениях тока, не вызывающих подъем проводников на уровень их подвеса, уменьшается максимальное тяжение.

Практический интерес при настройке дистанционных защит ВЛ представляет значение переходного активного сопротивления короткозамкнутой цепи  $R_{\Pi}$ , так как необходимо исключить его влияние на работу защит. Однако в реальных условиях к.з. кроме переменного, возрастающего во времени активного сопротивления дуги следует учитывать и дополнительные нелинейные составляющие активного и индуктивного сопротивлений проводов. В качестве примера на рис. 1 приведены кривые зависимости результирующего полного сопротивления короткозамкнутой цепи  $z_{к.з.}$  (ВЛ 110 кВ) от времени. Как видно, характер изменения указанного сопротивления в значительной степени определяется воздействием на процесс развития открытой электрической дуги и возможен отказ в действии второй ступени токовой и дистанционной защит на ВЛ 110 кВ.

Таким образом, исследования совместного влияния на ток к.з. приведенных выше факторов показали, что степень этого влияния различна в зависимости от напряжения ВЛ, длины исследуемого участка линии, материала и сечения проводов. Наибольшее влияние нелинейности исследуемой системы на ток к.з. проявляется для ВЛ 10, 35 и 110 кВ, в меньшей степени - для ВЛ 220, 330 и 500 кВ. При исследованиях переходных процессов, связанных с горизонтальным перемещением проводников навстречу друг другу (сближение,  $a(t) = a - 2 \cdot s(t)$ ), было принято, что токи к.з.

в двух фазах имеют одинаковое направление. Это возможно, например, при трехфазном к.з.

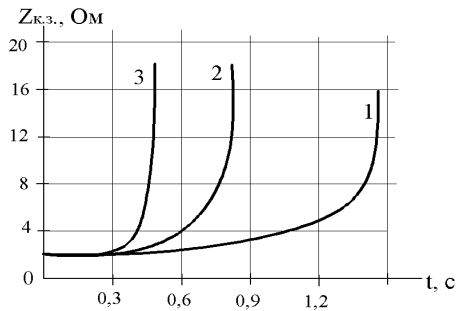


Рис. 1. Изменение во времени сопротивления короткозамкнутой цепи при к.з. на ВЛ 110 кВ с учетом сопротивления дуги, изменения активного и индуктивного сопротивлений проводов ВЛ при разной скорости ветра: 1 –  $v_B = 0$ ; 2 –  $v_B = 10$  м/с; 3 –  $v_B = 25$  м/с.

Анализ результатов расчета показал, что продолжительность процесса сближения проводов ограничивается моментом, когда происходит их схлестывание. Так, при принятых расчетных условиях для ВЛ 110 кВ схлестывание происходит примерно через 0,23 с (при учете влияния дуги, увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений проводов ВЛ). К этому моменту ток к.з. снизился от 32 кА в зависимости от скорости ветра ( $v_B = 0$ ,  $v_B = 10$  м/с;  $v_B = 25$  м/с) соответственно до 30, 27 и 23 кА.

## Выводы

1. Разработана математическая модель нелинейной электрической системы с гибкими проводниками, описывающая явления, сопровождающие к.з.
2. Степень увеличения активного сопротивления проводников вследствие их нагревания током к.з. зависит от условий протекания к.з. и значительно для ВЛ 6-110 кВ.
3. При смещениях проводов ВЛ вследствие к.з. наибольшие изменения их индуктивного сопротивления (до 14%) возможны в основном для ВЛ 6-220 кВ.

## ДІЯ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В МЕРЕЖІ З ГНУЧКИМИ ПРОВІДНИКАМИ З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНОСТІ СИСТЕМИ

I.V. Pantelieva

Матеріали статті присвячені деяким аспектам впливу струмів короткого замикання (к.з.) на електричну мережу, особливо їх електродинамічний і термічний вплив. Зазвичай в розрахунку струмів к.з. не враховують нелінійність досліджуваної системи. Виникає необхідність обліку взаємного впливу таких факторів і створення комплексної математичної моделі розрахунку нелінійності, наприклад, в системах з гнучкими провідниками.

**Ключові слова:** струм короткого замикання, електрична мережа, нелінійність, математична модель, гнучкий провідник, повітряна лінія, електрична дуга.

## INFLUENCE OF CURRENTS OF SHORT CIRCUIT IN A NETWORK WITH FLEXIBLE EXPLORERS TAKING INTO ACCOUNT NON-LINEARITY OF THE SYSTEM

I.V. Pantelieva

Content articles are devoted to some aspects of the impact of short-circuit (short circuit) on electrical network, especially its electrodynamic and thermal stresses. Typically, short-circuit currents in the calculation not taken into account, are also nonlinear system under investigation. There is a need to consider the mutual influence of these factors and the development of a comprehensive mathematical model for calculating nonlinearity, for example, in systems with flexible conductors.

**Keywords:** current of short circuit, electric network, non-linearity, mathematical model, flexible explorer, air-track, voltaic arc.

4. Учет совместного влияния открытой электрической дуги и изменения активного и индуктивного сопротивлений проводников повышает точность оценки электродинамической стойкости системы с гибкими проводниками во времени по сравнению с оценками, не учитывающими динамику изменения токов к.з.

5. При определении максимального тяжения проводников следует рассматривать случаи, при котором проводники перемещаются в пространстве в противоположных направлениях.

6. При дуговом к.з. возможен отказ в действии второй ступени токовой дистанционной защиты на ВЛ 110 кВ и третьей ступени (2 ступени при выдержке 1 с) дистанционных защит на ВЛ 220 кВ.

7. Учет затухания тока к.з. вследствие роста результирующего полного сопротивления короткозамкнутой цепи во времени повышает точность расчета токов к.з. в сетях 6-500 кВ.

8. Рекомендуется учитывать влияние нелинейности элементов электрической системы при анализе в ней переходных процессов, а также при разработке нормативных материалов, связанных с короткими замыканиями.

## Список литературы

1. Кудрявцев Е.П. Инженерный расчет прочности и смещений гибких шин при коротких замыканиях / Е.П. Кудрявцев // Изв. вузов. Энергетика. – 1994. – № 11. – С. 19-24.
2. Calcul des effets des courants de court-circuit. – Norme de la CEI. – Publication 866. – 1996.
3. Кулиев А.М. Об оценке влияния открытой электрической дуги на динамическую устойчивость системы / А.М. Кулиев // Изв. вузов. Энергетика. – 1999. – №3. – С. 8-11.
4. Руденберг Р. Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок / Р. Руденберг // Л.: Энергия. – 2001. – С. 2-5.
5. Бургсдорф В.В. Открытые электрические дуги большой мощности / В.В. Бургсдорф // Электричество. – 2008. – №10. – С. 12-15.

Поступила в редколлегию 1.10.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.И. Канюк, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.