

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
МИНИСТЕРСТВА ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ЭНЕРГЕТИКА

4
1982

ИЗДАНИЕ БЕЛОРУССКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

МИНСК

СО Д Е Р Ж А Н И Е

- Веников В. А. Научно-технические исследования в области электроэнергетики (современное состояние и задачи) 3

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Поспелов Г. Е., Федин В. Т., Гончаров В. М. Выбор мощности и мест размещения компенсирующих устройств для криогенных линий электропередачи 11
- Авакян М. А. Применение метода Ньютона для расчета режима заземления нейтралей трансформаторов энергосистем 17
- Чабан В. И. Расчет начальных условий в электроэнергетических системах при наличии эффективных узлов индуктивностей 21
- Абрамович Б. Н., Мельников А. М., Маркова И. Ф. Об учете влияния коммутации в бесщеточной системе возбуждения с синхронным возбудителем 26
- Кудрявцев Е. П. Случайные колебания гибких шин под действием ветровой нагрузки 31
- Тонконогов М. П., Лехт Ю. И., Булах В. И., Медведев В. Я. Установка для исследования термостимулированного тока жидких и твердых диэлектриков и изучение токов термодеполяризации в трансформаторных маслах 34
- Гловацкий Г. Г. Эффективность шунтирования человека, прикоснувшегося к фазе 38

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Берман Л. Д., Ефимочкин Г. И. Повышение эффективности конденсационных и регенеративных установок мощных паровых турбин 42
- Волков Ю. В., Любченко В. Ф., Шейнкман А. Г. Анализ стохастических свойств запасов до предельной мощности испарительных каналов реакторов Белоярской АЭС по эксплуатационным данным 49
- Похорилер В. Л., Шкляр А. И. Моделирование прогрева ротора паровой турбины при двухмерном температурном поле и изменяющихся условиях теплообмена с греющим паром 55
- Перельман Р. Г., Бодрышев В. В., Пряхин В. В., Карпин Е. Б., Матросова Л. В., Чеботарев В. Н. Влияние эрозийного износа на вибрационные характеристики лопаток осевых турбомашин 60
- Ефремцев В. С., Цедик В. А. Движение твердой фазы в аппаратах пульсирующего слоя с погруженными поверхностями 65
- Подымов В. Н. К вопросу об инженерном расчете систем импульсной очистки 69

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

- Александрова Т. А., Старицкий В. Г., Топаж Г. И., Чечель Н. С. Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования рабочих колес радиально-осевых гидротурбин высокой быстроходности 74
- Ковальногов А. Ф., Омельницкий В. Г., Родионов В. П. Экспериментальное исследование изменения полного давления вдоль оси затопленной струи жидкости при кавитационных режимах истечения 79

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

- Калужный А. Х., Лукашов Э. С., Певзнер Ю. С. Об использовании величины синхронизирующей мощности для исследования аperiodической устойчивости сложных энергосистем 83
- Жежеленко И. В., Савина Н. В. Физическое моделирование экранированных шинопроводов промышленной частоты 87
- Долин А. П. Приближенный расчет колебаний проводов, расположенных в одной вертикальной плоскости 91

Усманов Ф. Х., Кабашов В. Ю., Ахметшин Э. А. Определение координат и зоны возможного схлестывания проводов ВЛ 6—10 кВ	95
Савин А. Г. Каскадные выпрямители со ступенчатым регулированием выходного напряжения	98
Жуйков В. Я., Коротеев И. Е. Расчет гармонического состава токов и напряжений в преобразовательных устройствах	101
Немцев З. Ф., Тимошенко А. М. Раздельный подогрев деаэрируемых потоков в деаэраторах	104
Готовский М. А., Магидей П. Л., Агафонова Н. Д. Расчет необратимых потерь при движении пароводяной смеси в условиях существенного влияния гравитационных сил	110
Гарбуз А. А., Тонконогий Ю. Л. К вопросу об оптимальном расстоянии сопла от камеры смещения в газовых эжекторах	113
Антропов Г. В., Ларина Н. И. К вопросу определения оптимальной скорости в паропроводах острого пара	116
Манушин Э. А., Данилов Р. Е. Экспериментальное исследование способов охлаждения кормовой части сопловой лопатки для полузакнутых систем охлаждения	120
Колобков П. С., Николаенко В. Е., Демин В. М. Расширение возможностей отвода низкопотенциального вторичного тепла с сетевой водой на примере использования охлаждения блюмов (слябов)	123

ЮБИЛЕИ

Профессор Валентин Андреевич Веников (к 70-летию со дня рождения)	128
---	-----



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. М. ЛЕОНКОВ (главный редактор), Н. А. ТИНЯКОВ (зам. главного редактора), А. И. АНДРЮЩЕНКО, В. А. ВЕНИКОВ, Ю. М. ВОЛОКОБИНСКИЙ, Г. А. ГЕНРИХ, Д. Я. ГЛУХОВ, И. Э. ИБРАГИМОВ, В. М. ИЛЬИН, А. Д. КЛЮЧНИКОВ, В. П. ЛАРИОНОВ, А. Т. ЛЕБЕДЕВ, А. И. ЛЕОНТЬЕВ, В. И. НОВАШ, В. И. ОБРЕЗКОВ, В. Р. ОКОРОКОВ, Н. Г. РАССОХИН, А. И. РУЦКИЙ, Е. Я. СОКОЛОВ, С. В. УСОВ, В. И. ХВОСТОВ, Д. С. ЩАВЕЛЕВ, И. П. ЭПИК.

Ответственный секретарь редакции М. В. Любомудрова

Редактор Т. В. Ермоленко

Корректор Т. Ф. Добыш

Сдано в набор 25.2.1982 г. Подписано к печати 14.4.1982 г. АТ 05586. Бумага типографская. Формат бумаги 70×108¹/₁₆. Гарнитура шрифта литературная. Усл. печ. л. 11,2. Уч.-изд. л. 12,3. Тираж 2230 экз. Заказ 788. Цена 1 р. 20 к.

Адрес редакции: 220027, Ленинский пр., 65. Белорусский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт, корп. 2, ком. 215.

Адрес ордена Трудового Красного Знамени типографии издательства ЦК КП Белоруссии: 220041, Минск, Ленинский пр., 79.

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ КОЛЕБАНИЙ ПРОВОДОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ОДНОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Канд. техн. наук А. П. ДОЛИН

Московский ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции энергетический институт

Расчет колебаний проводов линий электропередач и ошиновки распределительных устройств при коротких замыканиях (к. з.) проводился, например, в [1, 2 и др.]. В этих работах считалось, что провода всех фаз подвешены на одном уровне. Ниже обсуждается приближенное решение задачи о колебании проводов, расположенных в одной вертикальной плоскости (рис. 1), при к. з.

Провод можно рассматривать как гибкую нить. Расчет движения нити под действием электродинамической нагрузки—весьма сложная и трудоемкая задача. Существенные упрощения можно получить, если принять электродинамические нагрузки равномерно распределенными вдоль проводов, а их значения определять так же, как для прямолинейных нитевидных проводников. Расстояние между проводниками целесообразно принять равным расстоянию между центрами тяжести проводов. Согласно [3], электродинамические нагрузки (Н/м), вызванные взаимодействием токов двух фаз,

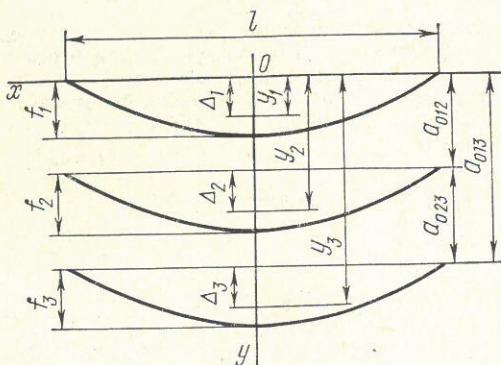


Рис. 1

$$q = -\frac{\alpha}{a} I_m^2 \sum_{n=1}^6 D_n T_n, \quad (1)$$

где $\alpha = 2 \cdot 10^{-7}$ Н/А²;

a — расстояние между центрами тяжести проводов, м;

I_m — амплитуда периодической составляющей тока к. з., А;

D_n ($n=1, 2, \dots, 6$) — постоянные коэффициенты, определяемые углом включения тока к. з. и видом к. з.;

T_n — функции времени, равные

$$T_1 = 1; \quad T_2 = e^{-2t/T_a}; \quad T_3 = e^{-t/T_a} \sin \omega t;$$

$$T_4 = e^{-t/T_a} \cos \omega t; \quad T_5 = \sin 2\omega t; \quad T_6 = \cos 2\omega t;$$

здесь t — время, с;

T_a — постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока к. з., с;

ω — угловая частота тока в сети, рад/с.

Дальнейшее упрощение расчета можно получить, если принять уравнение кривой провода в пролете при к. з. близким к уравнению цепной линии. Тогда движение проводов, расположенных в вертикальной плоскости, под действием электродинамических нагрузок без учета рассеяния энергии можно описать дифференциальным уравнением второй степени относительно обобщенных координат y , являющихся координатами центров тяжести проводов:

$$M_k \frac{d^2 y_k}{dt^2} = G_k - P_k + Q_k \quad (k=1, 2, 3), \quad (2)$$

где k — индекс, указывающий номер фазы (k равно 1 — фаза А; 2 — фаза В; 3 — фаза С);

M_k — приведенная масса провода с номером k , кг;

G_k — вес провода, Н;

P_k — обобщенная восстанавливающая сила, Н;

Q_k — результирующая электродинамическая сила, Н.

Приведенную массу провода примем равной массе провода в пролете

$$M = m_0 L_0,$$

где m_0 и L_0 — погонная масса, кг/м, и длина, м, недеформированного провода (здесь и ниже индекс k для упрощения записи опущен).

Вес провода, электродинамическая нагрузка и восстанавливающая силы равны

$$G = m_0 g L_0; \quad Q = ql; \quad P = p_n L,$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²;

l — длина пролета, м;

L — длина деформированного провода, м;

p_n — восстанавливающая нагрузка, Н/м.

Принимая во внимание, что отношения

$$l/L_0 \approx L/L_0 \approx 1,$$

уравнение (2) приводится к виду

$$m_0 \frac{d^2 y}{dt^2} = m_0 g - p_n + q. \quad (3)$$

Для решения уравнения (3) необходимо предварительно определить восстанавливающую нагрузку p_n . Воспользуемся для этого зависимостями длины провода в полете от деформации (или нагрузки) и от стрелы провеса [4]. Для упрощения примем температуру провода при к. з. и после его отключения постоянной. Длина провода с учетом его деформаций определяется как

$$L = L_0(1 + \epsilon), \quad (4)$$

где ϵ — деформация провода, примерно равная в нижней точке пролета

$$\epsilon = \frac{l^2 p}{8 E f s}; \quad (5)$$

здесь E — модуль упругости, Па;

f — стрела провеса, м;

p — равномерно распределенная вдоль провода нагрузка, Н/м;

s — сечение провода, м².

Пренебрегая разностью деформаций в нижней и верхних точках провода, в соответствии с (4) и (5) получим

$$L = L_0 \left(1 + \frac{l^2 p}{8 E f s} \right). \quad (6)$$

С другой стороны, длину провода в полете с достаточно высокой точностью можно определить как [4]

$$L = l + 8f^2/3l. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (6) и проведя преобразования, получим

$$\frac{64sE}{3l^3 L_0} f^3 + 8Esf \left(\frac{1}{L_0 l} - \frac{1}{l^2} \right) = p. \quad (8)$$

Зависимость (8) справедлива, если деформации провода отличны от нуля. Согласно уравнению (7), наибольшая по абсолютной величине стрела провеса, при которой деформация провода равна нулю, составляет

$$f_0 = \sqrt{\frac{3l(L_0 - l)}{8}}, \quad (9)$$

а длина недеформированного провода в соответствии с (6) и (7)

$$L_0 = \frac{(3l^2 + 8f_0^2) 8E f_0 s}{3l(8E f_0 s + l^2 m_0 g)}, \quad (10)$$

где f_0 — стрела провеса свободно висящего провода (при действии только силы тяжести).

Таким образом, восстанавливающая нагрузка p_n определяется по формуле (8), если $|f| \geq f_0$. Если $|f| \leq f_0$, то в соответствии с принятыми допущениями $p_n = 0$.

В качестве примера на рис. 2 представлена зависимость восстанавливающей нагрузки p_n от стрелы провеса f , вычисленная по указанным выше формулам. Провод марки А-50, длина пролета $l = 40$ м, погонная масса провода $m_0 = 0,135$ кг/м, стрела провеса при отсутствии внешних нагрузок $f_0 = 0,53$ м. Модуль упругости в соответствии с указаниями ПУЭ принят равным $E = 63 \cdot 10^9$ Па.

На графике (рис. 2) абсциссе f_0 соответствует ордината $p_n = m_0 g$. В точках $\pm f_0$

равных по абсолютной величине 0,43 м, значение p_n обращается в нуль. В этих точках кривая восстанавливающей нагрузки имеет излом. Вычисления показывают, что длины недеформированного и свободно висящего провода (при отсутствии внешних нагрузок) соответственно равны $L_0 = 40,012$ м, $L_G = 40,019$ м.

Можно показать, что расстояние от уровня подвески провода до центра тяжести провода (центра тяжести цепной линии) Δ примерно равно $2f/3$. Поэтому обобщенные координаты y и расстояния между центрами тяжести проводов a связаны со стрелами провеса f следующими зависимостями:

$$y_k = H_k + \Delta_k = H_k + 2f_k/3 \quad (k=1, 2, 3); \quad (11)$$

$$a_{kj} = y_k - y_j = \frac{2}{3} (f_k - f_j) + a_{0kj} \quad (k=1, 2, 3; k \neq j), \quad (12)$$

где H_k — расстояние от оси абсцисс до уровня подвески провода с номером k ;

$a_{0kj} = H_k - H_j$ — расстояние между центрами тяжести проводов с номерами k и j до к. з.

Таким образом дифференциальные уравнения (3) с учетом (1), (11) и (12) приводятся к виду

$$\frac{2}{3} m_0 \frac{d^2 f_k}{dt^2} = m_0 g + \sum_{j=1, j \neq k}^3 \left[\frac{\alpha I_m l m_j}{2(f_k - f_j)/3 + a_{0kj}} \sum_{n=1}^6 D_{nk} T_n(t) \right] - p_n(f_k) \quad (k=1, 2, 3), \quad (13)$$

где

$$p_n = \begin{cases} 0 & \text{при } |f_k| \leq f_0; \\ p(f_k) & \text{при } |f_k| > f_0. \end{cases}$$

здесь p — нагрузка, определяемая по формуле (8).

Решения уравнений (13) позволяют найти также значения напряжений в нижних точках провеса проводов. Согласно [4], напряжение, Па,

$$\sigma = E \epsilon = \frac{l^2 p_n}{8 f s}. \quad (14)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (13) проводилось методом Рунге — Кутты на ЭВМ ЕС-1033. Расчеты показали, что периодические составляющие ($n=3, 4, 5, 6$) электродинамических нагрузок (1) практически не оказывают влияния на величину отклонения проводов при к. з. Весьма слабо влияют на колебания аperiodические составляющие ($n=2$) этих нагрузок. Поэтому при расчете колебаний проводов при к. з. можно учитывать только постоянную составляющую электродинамической нагрузки.

На рис. 3 представлены кривые отклонения средних точек проводов при двухфазном к. з. и после его отключения. Параметры проводов взяты такими же, как при построении зависимости восстанавливающей нагрузки (рис. 2). Расстояние между проводами до к. з. $a_0 = 0,4$ м, амплитуда периодической составляющей тока к. з. $I_m = 3,1$ кА, продолжительность к. з. $t_k = 0,16$ с. Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока к. з. принята равной нулю.

Вначале к. з. верхний провод поднимается, а нижний опускается. После отключения к. з. благодаря запасенной кинетической энергии провода некоторое время продолжают движение в том же направлении. Наибольшее отклонение верхнего провода составляет 0,34 м, а нижнего — 0,17 м. Далее провода движутся в обратном направлении. Средняя точка верхнего провода опускается относительно положения равновесия на 0,18 м, а нижнего провода, наоборот, поднимается на 0,28 м.

Напряжения в нижних точках проводов до к. з. были равны 10 МПа. При колебаниях напряжение в верхнем проводе достигает 34 МПа (при $t = 0,6$ с), а в нижнем — 32 МПа (при $t = 0,16$ с). Следовательно, напряжения возрастают почти в 3,5 раза.

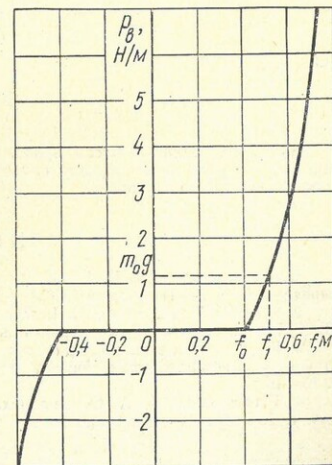


Рис. 2

В периоды 0,1—0,47 с для верхнего провода и 0,31—0,62 с для нижнего восстанавливающие силы (и напряжения в проводах) близки к нулю. В этих интервалах при любом случайном воздействии наиболее вероятно возникновение горизонтальной составляющей колебаний проводов. Можно ожидать, что амплитуда последней окажется близкой к амплитуде колебаний в вертикальной плоскости.

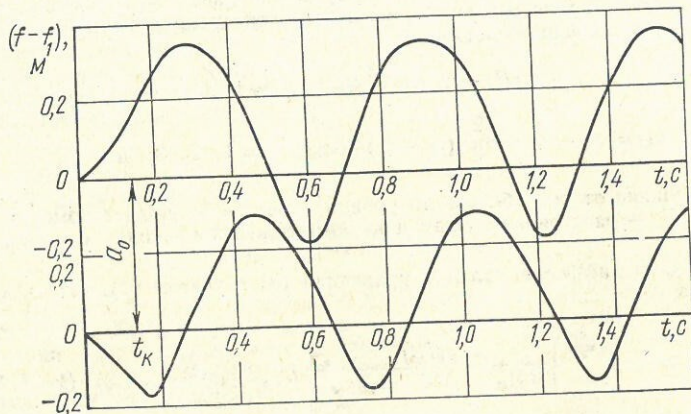


Рис. 3

Таким образом, предлагаемая в статье методика расчета может быть использована для приближенных оценок отклонений проводов и напряжений в их материале при непродолжительных (не более 0,2—0,4 с) к. з. и после их отключения. Точность расчета, видимо, будет выше для тяжелых проводов с малой стрелой провеса. Некоторые уточнения результатов расчета колебаний проводов в вертикальной плоскости можно получить, изменив значение приведенной массы провода M , а также подобрав более оптимальную зависимость восстанавливающей нагрузки. Например, можно принять

$$p_B = \begin{cases} \frac{m_0 g}{f_G} f & \text{при } f \leq f_G; \\ p(f) & \text{при } f \geq f_G. \end{cases}$$

или

$$p_B = \frac{m_0 g}{f_G^3} f^3.$$

Выбор приведенной массы провода, а также уточнение зависимости восстанавливающей нагрузки целесообразно проводить на основе экспериментальных данных для различных типов проводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев Е. П. К расчету сближения проводов в пролетах линий электропередач при к. з.— Изв. вузов СССР — Энергетика, 1973, № 3, с. 7—11.
2. Craig D. B., Ford G. L. The response of strain bus to short circuit current.— IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. v. 99, 1980, N 2, p. 434—442.
3. Кудрявцев Е. П., Долин А. П. Методика расчета электродинамической стойкости токопроводов с учетом податливости опор.— Электричество, 1977, № 5, с. 15—19.
4. Глазунов А. А. Основы механической части воздушных линий электропередач, т. 1. Работа и расчет проводов и тросов.— М.—Л.: Госэнергоиздат, 1956.— 192 с.


ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА на 1982 год

НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ МВ ССО СССР» по разделу «ЭНЕРГЕТИКА»


Издается с 1958 года

Журнал рассчитан на инженерно-технических работников энергетических и промышленных предприятий, работников научно-исследовательских институтов и проектных организаций, научных работников вузов и техникумов и студентов старших курсов.

В журнале публикуются материалы по новейшим достижениям в области энергетики и освещаются

- | | | |
|---|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Научно-исследовательские работы. 2. Итоги внедрения законченных работ. 3. Дискуссии по актуальным вопросам энергетики. 4. Материалы межвузовских научных конференций и совещаний. |  | <ol style="list-style-type: none"> 5. Отдельные разделы диссертационных работ. 6. Отзывы на монографии, учебники и учебные пособия. 7. Научная и техническая информация между вузами, научно-исследовательскими, проектными учреждениями и производственными предприятиями. |
|---|---|--|

ЖУРНАЛ ИМЕЕТ СЛЕДУЮЩИЕ РАЗДЕЛЫ:

- | | | |
|--|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Общая энергетика. 2. Электрические станции, сети и системы. 3. Релейная защита и системная автоматика. 4. Техника высоких напряжений. 5. Теоретические вопросы электроэнергетики. 6. Электроснабжение и автоматизация систем электроснабжения. 7. Теплоэнергетические установки электростанций. 8. Вопросы топливоиспользования и водоподготовки электрических |  | <p>станций и промышленных установок.</p> <ol style="list-style-type: none"> 9. Теплофикация и теплоснабжение. 10. Промышленная теплоэнергетика. 11. Теоретические вопросы теплоэнергетики. 12. Теплофизика. 13. Гидроэнергетические установки. 14. Экономика энергетики. 15. Научно-методические вопросы. 16. Хроника и научно-техническая информация. 17. Библиография. |
|--|---|---|

Цена отдельного номера

— 1 руб. 20 коп.

Подписная цена на год за 12 номеров 14 руб. 40 коп.

Подписка принимается с любого очередного месяца в пунктах приема подписки и агентствах «Союзпечать» и общественными распространителями печати на промышленных предприятиях, в научно-исследовательских институтах, проектных и конструкторских организациях и учебных заведениях. Отдельные номера журнала можно выписать наложенным платежом через редакцию журнала.

**Адрес редакции: 220027, Минск, Ленинский пр., 65.
Белорусский политехнический институт,
тел. 32-65-14.**