

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯТОРОВ И ТОКОПРОВОДЯЩИХ ШИН НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Александр Кириченко¹, Игорь Сидорика²

¹*Николаевский национальный аграрный университет*

Ул. Парижской коммуны, 9, г. Николаев, Украина. E-mail: askyrychenko@gmail.com

²*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова*

Пр. Героев Сталинграда, 9, г. Николаев, Украина. E-mail: igor.sidorika@yandex.ru

Olexandr Kyrychenko¹, Igor Sidorika²

¹*Nikolaev National Agrarian University*

St. Paris Commune, 9, Nikolaev, Ukraine. E-mail: askyrychenko@gmail.com

²*National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov*

Pr. Heroes of Stalingrad, 9, Nikolaev, Ukraine. E-mail: igor.sidorika@yandex.ru

Аннотация. В результате проведенного обзора ряда работ по исследованию изоляторов и токопроводящих шин на электродинамическую стойкость в качестве наиболее удобного выбран аналитический метод расчета. С использованием этого аналитического метода выполнено исследование влияния геометрических параметров изоляторов и однополосных прямоугольных токопроводящих шин из алюминиевого сплава на электродинамическую стойкость при коротком замыкании. Полученные характеристики для максимального напряжения в материале шин и для нагрузки на изоляторы проверены на соответствие условиям электродинамической стойкости.

Приведен алгоритм расчета для исследования влияния геометрических параметров изоляторов и токопроводящих шин на электродинамическую стойкость при коротком замыкании.

В качестве примера исследована электродинамическая стойкость при коротком замыкании однополосных шин прямоугольного сечения $10 \times 0,6$ см из алюминиевого сплава с модулем упругости $E = 7 \cdot 10^{10}$ Па, которые обращены друг к другу узкими сторонами. Расстояние между шинами составляет $a = 0,7$ м, ударный ток трехфазного короткого замыкания равен $i_{уд} = 87$ кА, постоянная времени принята равной $T_a = 0,05$ с.

Выполнен расчет и получены зависимости частоты собственных колебаний f шины, динамического коэффициента η , максимального напряжения в материале шин σ_{max} и нагрузки на изоляторы

R_{max} для различной длины пролета l .

Кроме того, рассчитаны и получены зависимости для момента инерции J , момента сопротивления W , частоты собственных колебаний f шины, динамического коэффициента η , максимального напряжения в материале шин σ_{max} и нагрузки на изоляторы R_{max} при фиксированной длине проле-

та l для различной длины h и ширины b однополосной прямоугольной шины.

Результаты анализа полученных характеристик свидетельствуют о соответствии выбранных геометрических параметров изоляторов и однополосных прямоугольных токопроводящих шин условиям электродинамической стойкости при коротком замыкании для рассмотренных диапазонов значений.

Ключевые слова: токопроводящая шина, изолятор, короткое замыкание, электродинамическая устойчивость, максимальное напряжение, нагрузка на изоляторы.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Токопроводящие шины широко распространены как в низковольтных электрических установках, где они используются для замыкания нескольких отдельных электрических цепей, так и в высоковольтных установках, где они применяются в определенных местах соединения высоковольтной аппаратуры для обеспечения низкого активного и реактивного сопротивления, при этом достигается сокращение трудозатрат.

За счет токопроводящих шин удается получить значительное снижение расхода рабочего материала, что весьма важно, так как для их изготовления используются дорогостоящая медь, алюминий, сталь и различные сплавы. На электрических подстанциях и распределительных устройствах токопроводящие шины могут эксплуатироваться на открытом воздухе без защитных кожухов.

Учитывая, также, то обстоятельство, что применение токопроводящих шин позволяет уменьшить площадь установок, возникает необходимость в правильном выборе геометрических параметров шин. Правильный выбор геометрических параметров токопроводящих шин позволяет достичь соблюдения жестких габаритных требований к размерам электроустановок в силу особенностей условий их эксплуатации.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Проведен обзор ряда работ, которые посвящены исследованию электродинамической стойкости электрической аппаратуры и энергетического оборудования. Выполнено сравнение подходов к расчету максимальных напряжений в материалах шин и нагрузок на изоляторы методами математического, имитационного и физического моделирования.

В [1] представлены основы теории, принципы построения и функционирования систем передачи и распределения электрической энергии, кроме того проанализированы варианты расчета и анализа параметров и рабочих режимов электрических сетей инженерными и численными методами с использованием компьютерной техники. Приведены характеристики многорежимности и методы расчета потерь электроэнергии. Показаны принципы построения, оптимизации проектных решений, анализа эксплуатационных режимов и управления ими. Кроме того, рассмотрены примеры решения энергетических задач с подробными пояснениями. В приложении представлены справочные материалы, необходимые для решения подобных задач.

Применению современных шинодержателей в различных конструкциях жесткой ошиновки посвящена работа [6].

В [7] методом физического моделирования проведена оценка поперечных механических деформаций проводов обмотки трансформаторов, вызванных фактором короткого замыкания витков.

Вопросы электродинамической стойкости трансформаторов и другого энергетического оборудования электростанций рассмотрены в [8, 15].

В [9] проанализированы общие требования к эксплуатации электрических подстанций и распределительных устройств различных уровней напряжения. Рассмотрены вопросы технического обслуживания оборудования подстанций и распределительных устройств, особенности эксплуатации отдельных видов оборудования, порядок и последовательность выполнения оперативных переключений. Даны рекомендации по предупреждению и устранению отказов оборудования и аварийных ситуаций в электрических сетях, по действиям персонала при аварийном отключении оборудования подстанций. Также, представлен перечень необходимой оперативной документации, и изложены принципы организации работы с персоналом энергетических предприятий.

Особенности механизации производственных процессов при условии уравновешенного развития фермерских хозяйств проанализированы в [12]. Доказано, что уровень механизации зависит от состояния технической базы фермерских хозяйств. Определено значение механизации в сельском хозяйстве. Представлена схема организации механизированных работ в фермерских хозяйствах. Предложены пути улучшения механизации производственных процессов.

В [13] приведены основные данные о параметрах и характеристиках электрических машин, сило-

вых трансформаторов, электрических аппаратов и проводников, а также материалы для разработки главных схем, схем собственных нужд и конструкций распределительных устройств электростанций и подстанций.

Экспериментальные и аналитические методы построения моделей технологических объектов управления изложены в работе [14]. В ней систематизирован материал множества литературных источников и результатов исследований, выполненных авторами. Рассмотрены эмпирические методы с примерами идентификации реальных промышленных объектов, при этом значительное внимание уделено проблемам оценки точности и планирования экспериментов. Кроме того, показаны особенности создания аналитических моделей различной степени приближения, выполнен сравнительный анализ их характеристик.

Анализ конструктивно-геометрических и технологических особенностей, а также классификация пространственных магнитопроводов трехфазных статических индукционных устройств представлена в [16].

В работе [17] изложена информация по разработке компьютерной программы и оценке с ее помощью путем имитационного моделирования электродинамической стойкости воздушных линий электропередачи.

Векторно-матричный метод расчета, учитывающий жесткость проводов спусков на изгиб, позволяющий определить мгновенные положения гибких шин и спусков в любой момент при коротком замыкании и после его отключения и оценить способы повышения электродинамической стойкости гибкой ошиновки распределительных устройств разработан в [18].

В [19] предложен новый способ восстановления деталей машин в условиях малых ремонтных предприятий сельскохозяйственной техники, который отличается эффективностью и малозатратностью, поскольку позволяет использовать дешевые проволоки с нанесением на них различных порошковых композиций. При такой технологии восстановления с введением легирующих добавок важно установить характер напряженного состояния, формируемого в зонах наплавки и термического влияния.

Режимы работы основного оборудования электростанций и подстанций, а также анализ их характеристик изложены в [20]. Рассмотрены схемы и электрооборудование электрических станций и подстанций, режимы работы генераторов, систем возбуждения, трансформаторов, электродвигателей и механизмов собственных нужд. Приведен анализ режимов работы коммутационной аппаратуры при отключении цепей переменного и постоянного тока, а также при отключении линий электропередачи большой протяженности.

В [21] приводятся сведения по проектированию электрических сетей энергосистем, методам технико-экономических расчетов, выбору параметров и схем сетей, данные по электрооборудованию, воздушным и кабельным линиям, по стоимости элементов электрических сетей. Учтены изменения

структуры современной энергетики и требования новых нормативных документов; приведены новые технические данные по кабельным линиям, автотрансформаторам, коммутационным аппаратам и другим видам оборудования, а также уточненные стоимостные показатели объектов сетевого хозяйства; рассмотрены современные подходы к формированию тарифов на электроэнергию.

В [22] предложена методика расчета динамических усилий в шихтованных шинных пакетах при коротком замыкании, основанная на методах полевого моделирования и конечных элементов. Введены коэффициенты коррекции электродинамических сил в шинах и изоляторах, что обеспечивает высокую точность и вычислительную эффективность расчетов электродинамической стойкости при коротком замыкании.

Расчет токопроводящих шин, расположенных в вертикальном и горизонтальном положениях, на электродинамическую стойкость при трехфазном коротком замыкании рассмотрен в [23]. Результат расчета показал, что на шины, расположенные в вертикальном положении воздействует в 2 раза большая электромагнитная сила.

В [24] рассмотрены результаты исследования изоляторов и токопроводящих шин на электродинамическую устойчивость при коротком замыкании в распределительных устройствах до 35 кВ, на конкретном примере выполнена проверка максимального напряжения в материале шин и нагрузки на изоляторы.

Исходя из проведенного обзора, принято выполнить проверку изоляторов и токопроводящих шин на электродинамическую стойкость аналитическим методом.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачей данной статьи является анализ влияния геометрических параметров изоляторов и токопроводящих шин распределительных устройств напряжением до 35 кВ на электродинамическую стойкость при коротком замыкании на основе зависимостей для максимального напряжения в материале шин σ_{\max} и нагрузки на изоляторы R_{\max} , полученных аналитическим методом расчета.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Исследование шинных конструкций на жестких опорах, как правило, предполагает расчет колебаний систем шины-изоляторы. Поэтому для упрощения будем исследовать только средние пролеты длинного прямого участка шинной линии без ответвлений с равными расстояниями между изоляторами. Исследуемые пролеты шины находятся в одинаковых условиях, поэтому достаточно рассмотреть только один пролет, взяв во внимание содержание работ [2-5]. В распределительных устройствах до 35 кВ изоляторы (опоры) можно считать абсолютно жесткими [10]. В этом случае шину в пролете между изоляторами можно рассматривать как стержень (балку) с равномерно распределенной по длине массой и за-

мещенными концами (рис. 1, а). Анализ распределительных устройств от 110 кВ изложен в [11].

Известно, что балка является системой с бесконечным числом степеней свободы и обладает бесконечным множеством собственных частот колебаний. Тем не менее, колебания стержней в основном определяются первой формой собственных колебаний. Поэтому для упрощения заменим стержень с распределенной массой стержнем с массой сосредоточенной посередине пролета (рис. 1, б).

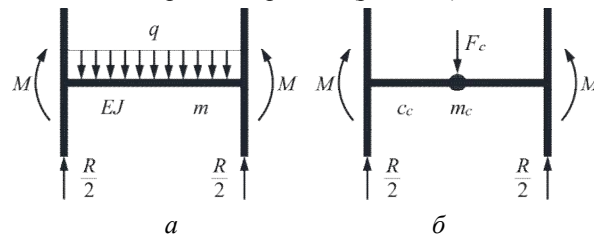


Рис. 1. Схема шины в пролете между изоляторами, рассмотренная как стержень (балка):

а – с равномерно распределенной по длине массой; б – с сосредоточенной массой посередине пролета

Fig. 1. The scheme of bus bars in the span between insulators (beam with supports):

а – mass is evenly distributed along the length; б – mass is concentrated in the middle of the span

Такой стержень обладает одной степенью свободы и имеет только одну частоту собственных колебаний. Если пренебречь рассеянием энергии при колебаниях шины, то движение системы с одной степенью свободы описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$m_c \frac{d^2 y_c}{dt^2} + c_c y_c = F_c, \quad (1)$$

где: m_c – масса системы с одной степенью свободы, кг, y_c – прогиб этой системы, м, c_c – жесткость системы, Н/м, t – время, с, F_c – сосредоточенная сила.

Решение данного дифференциального уравнения (1) следующее:

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

$$f_c = f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \quad (3)$$

$$c_c = c_{ш}, \quad (4)$$

где: q – электродинамическая нагрузка, Н/м, E – модуль упругости шины, Па, J – момент инерции шины относительно оси перпендикулярной плоскости изгиба, m^4 (приведен в табл. 1), f_c – частота собственных колебаний системы с одной степенью свободы, Гц, f_1 – первая (основная) частота колебаний шины, Гц, r_1 – параметр частоты (при абсолютно жестких изоляторах равный 4,73), $c_{ш} = \frac{EJ}{l^3}$

– жесткость шины, Н/м.

Частота, жесткость и масса связаны зависимостью:

$$\Omega^2 = (2\pi f)^2 = c/m, \quad (5)$$

где: Ω – угловая частота колебаний системы, рад/с.

Токопроводящие шины изготавливаются с различным профилем поперечного сечения, некоторые из основных типов сечений показаны на рис. 2.

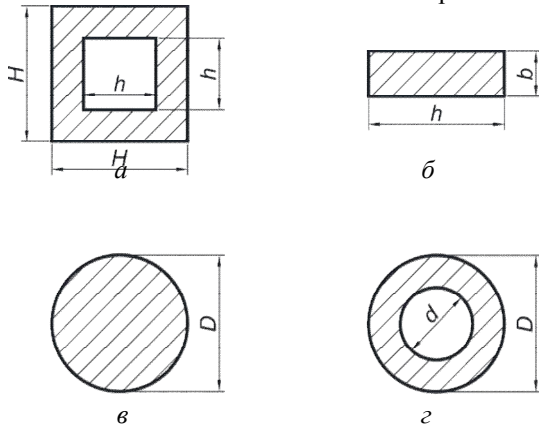


Рис. 2. Основные типы сечений токопроводящих шин:
 а – квадрат с квадратным отверстием; б – прямоугольник; в – круг; г – круг с круговым отверстием

Fig. 2. The principal types of cross-section for bus bars:

а – square with a square hole; б – rectangular; в – circular; г – circular with a circular hole

Если до короткого замыкания шины находились в покое, то решения дифференциального уравнения (1) имеет вид:

$$y = \frac{1}{m\Omega_0^2} \int_0^t F(\theta) \sin \Omega(t - \theta) d\theta, \quad (6)$$

где: θ – переменная, характеризующая время, меняющееся в процессе от 0 до t .

Подставим в выражение (6) значение силы (2) и умножим числитель и знаменатель на Ω , с учетом отношения (5) получим:

$$y = \frac{\alpha l}{ac} I_m^2 \sum_{n=1}^6 \int_0^t D_n T(\theta) \sin \Omega(t - \theta) d\theta. \quad (7)$$

Введем обозначение:

$$y(t) = \sum_{n=1}^6 D_n \chi_n(t) = \sum_{n=q}^6 D_n \int_0^t T(\theta) \sin \Omega(t - \theta) d\theta, \quad (8)$$

где: y_n – относительные прогибы ($n = 1, 2, \dots, 6$), вызванные действием отдельных составляющих T_n электродинамической нагрузки, y – полный относительный прогиб системы.

Таким образом:

$$y(t) = \frac{\alpha l}{ac} I_m^2 \sum_{n=1}^6 D_n y_n(t) = \frac{\alpha l}{ac} y(t). \quad (9)$$

Силы, действующие на изоляторы равнопролетных конструкций, равны:

$$R(t) = cy(t) = \frac{\alpha l}{a} I_m^2 \sum_{n=1}^6 D_n y(t) = \frac{\alpha l}{a} I_m^2 y(t). \quad (10)$$

Наибольшее напряжение в материале шины, возникающее в точках опорного сечения шины наиболее удаленных от оси ее изгиба, определяется как:

$$\sigma(t) = M(t)/W, \quad (11)$$

где: M – изгибающий момент, Н·м, W – момент сопротивления поперечного сечения шины, m^4 (приведен в табл. 1).

Изгибающий момент определяется по формуле:

$$M = \frac{cl}{12} y. \quad (12)$$

Таким образом

$$\sigma(t) = \frac{cl}{12W} y(t) = \frac{\alpha l^2}{12aW} I_m^2 \sum_{n=1}^6 D_n y_n(t) = \frac{\alpha l^2}{12aW} I_m y(t). \quad (13)$$

Момент инерции J (m^4) шины относительно оси перпендикулярной плоскости изгиба, а также момент сопротивления W (m^3) поперечного сечения шины приведены в табл. 1.

Таблица 1. Момент инерции J и момент сопротивления W токопроводящих шин с различным типом поперечного сечения

Table 1. Moments of inertia J and resistance W of bus bars with a different type of cross-section

Тип поперечного сечения	Момент инерции J	Момент сопротивления W
Квадрат с квадратным отверстием	$\frac{H^4 - h^4}{12}$	$\frac{H^4 - h^4}{6H}$
Прямоугольник	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{bh^2}{6}$
Круг	$\frac{\pi D^4}{64}$	$\frac{\pi D^3}{32}$
Круг с круговым отверстием	$\frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$	$\frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}$

Алгоритм расчета для исследования влияния геометрических параметров изоляторов и токопроводящих шин на электродинамическую стойкость при коротком замыкании содержит следующую последовательность действий:

1. Вычисляется момент инерции J и момент сопротивления шины W .

2. Определяется первая частота собственных колебаний f шины.

3. Определяется графически по справочным данным динамический коэффициент η .

4. Вычисляется максимальное напряжение в материале шин σ_{max} и нагрузки на изоляторы R_{max} .

5. Производится проверка полученных значений для максимального напряжения в материале шин σ_{max} и для нагрузки на изоляторы R_{max} на соответствие допустимым условиям электродинамической стойкости. В случае соблюдения допустимых условий расчет следует считать завершенным, в ином случае следует изменить исходные расчетные пара-

метры для изоляторов и токопроводящих шин и приступить к выполнению первого пункта данного алгоритма.

В соответствии с приведенными зависимостями (1)-(13) построены характеристики влияния геометрических параметров изоляторов и токопроводящих шин на их электродинамическую стойкость при коротком замыкании.

Расчеты проводились для однополюсных шин прямоугольного сечения $10 \times 0,6$ см из алюминиевого сплава с модулем упругости $E = 7 \cdot 10^{10}$ Па, которые обращены друг к другу узкими сторонами. Расстояние между шинами $a = 0,7$ м, ударный ток трехфазного короткого замыкания $i_{уд} = 87$ кА, постоянная времени $T_a = 0,05$ с.

На рис. 3 представлена зависимость первой частоты собственных колебаний f шины, динамического коэффициента η , максимального напряжения в материале шин σ_{max} и нагрузки на изоляторы R_{max} для различной длины пролета l при фиксированных длине и ширине однополюсной прямоугольной шины соответственно $h = 10$ см, $b = 0,6$ см.

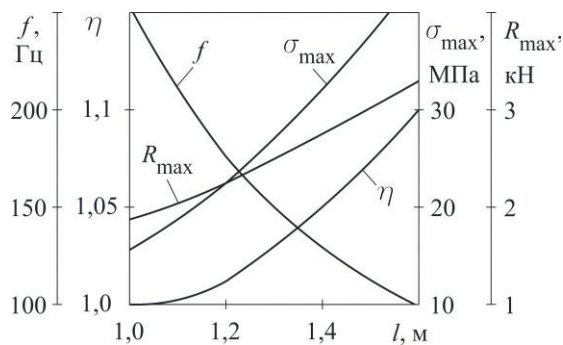


Рис. 3. Зависимость частоты собственных колебаний f шины, динамического коэффициента η , максимального напряжения в материале шин σ_{max} и нагрузки на изоляторы R_{max} для различной длины пролета l при $h = 10$ см, $b = 0,6$ см

Fig. 3. Functional dependence of the own bus frequency f , dynamic coefficient η , maximal tension in bus bar σ_{max} and isolator load R_{max} at $h = 10$ cm, $b = 0,6$ cm for different span's length l

Первая собственная частота f шины с увеличением длины пролета l от 1 до 1,6 м снижается в пределах от 300 до 100 Гц (рис. 3), безразмерный динамический коэффициент η при этом, напротив, возрастает от 1 до значения 1,1. Анализ кривых для максимального напряжения в материале шин σ_{max} и максимальной нагрузки на изоляторы R_{max} свидетельствует о прямой пропорциональной зависимости между ними и величиной длины пролета l . При этом соблюдаются условия электродинамической стойкости, поскольку во всем диапазоне значений l максимальное напряжение в материале шин $\sigma_{max} = 44$ МПа и максимальная нагрузка на изоля-

торы $R_{max} = 3,3$ кН не превышают допустимых для них значений соответственно $\sigma_{max} < 89,2$ МПа, $R_{max} < 4,5$ кН.

Кривые для момента инерции J , момента сопротивления W , частоты собственных колебаний f шины, динамического коэффициента η , максимального напряжения в материале шин σ_{max} и нагрузки на изоляторы R_{max} при фиксированной длине пролета шины $l = 1,6$ м, длине шины $h = 10$ см в зависимости ширины b шины продемонстрированы на рис. 4-5.

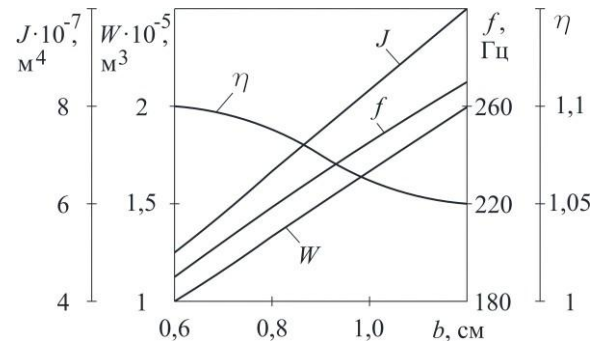


Рис. 4. Зависимость момента инерции J , момента сопротивления W , частоты собственных колебаний f шины и динамического коэффициента η при $l = 1,6$ м, $h = 10$ см для различных значений ширины b шины

Fig. 4. Functional dependence of moment of inertia J , moment of resistance W , the own bus frequency f , dynamic coefficient η at $l = 1,6$ m, $h = 10$ cm for different thickness b of bus bar

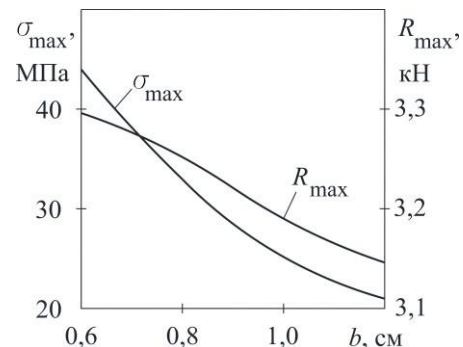


Рис. 5. Зависимость максимального напряжения в материале шин σ_{max} и нагрузки на изоляторы R_{max} при $l = 1,6$ м, $h = 10$ см для различных значений ширины b шины

Fig. 5. Functional dependence of maximal tension in bus bar σ_{max} and isolator load R_{max} at $l = 1,6$ m, $h = 10$ cm for different thickness b of bus bar

Анализ кривых (рис. 4) показывает, что увеличение ширины b шины приводит к возрастанию момента инерции J от $5 \cdot 10^{-7}$ до $10 \cdot 10^{-7}$ м⁴, увеличению момента сопротивления W от $1 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-5}$ м³ и возрастанию частоты собственных колебаний f шины в пределах от 200 до 300 Гц. При

этом динамический коэффициент η незначительно снижается от 1,1 до значения 1,05.

Максимальное напряжение в материале шин $\sigma_{\max} = 44$ МПа и нагрузки на изоляторы $R_{\max} = 3,3$ кН (рис. 5) не превышают предельно допустимых значений.

Кривые для момента инерции J , момента сопротивления W , частоты собственных колебаний f шины, динамического коэффициента η , максимального напряжения в материале шин σ_{\max} и нагрузки на изоляторы R_{\max} при фиксированной длине пролета шины $l = 1,6$ м, ширине шины $b = 0,6$ см в зависимости от длины h шины проиллюстрированы на рис. 6-7.

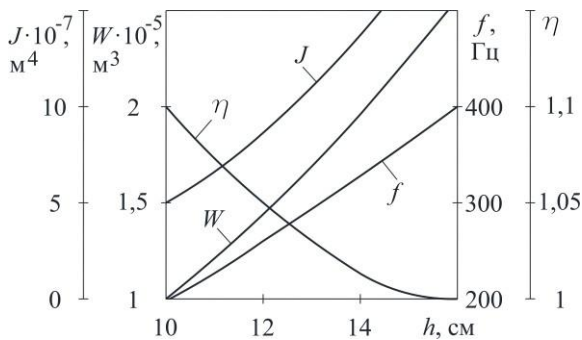


Рис. 6. Зависимость момента инерции J , момента сопротивления W , частоты собственных колебаний f шины и динамического коэффициента η при $l = 1,6$ м, $b = 0,6$ см для различных значений длины h шины

Fig. 6. Functional dependence of moment of inertia J , moment of resistance W , own bus frequency f , dynamic coefficient η at $l = 1,6$ m, $b = 0,6$ cm for different length h of bus bar

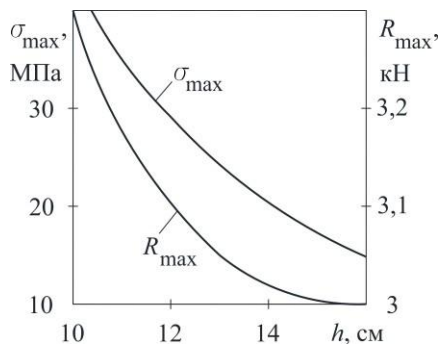


Рис. 7. Зависимость максимального напряжения в материале шин σ_{\max} и нагрузки на изоляторы R_{\max} при $l = 1,6$ м, $b = 0,6$ см для различных значений длины h шины

Fig. 7. Functional dependence of maximal tension in bus bar σ_{\max} and isolator load R_{\max} at $l = 1,6$ m, $b = 0,6$ cm for different length h of bus bar

Максимальное напряжение в материале шин σ_{\max} и нагрузка на изоляторы R_{\max} (рис. 7) не превышают предельно допустимых значений соот-

ветственно $\sigma_{\max} < 89,2$ МПа и $R_{\max} < 4,5$ кН по условиям электродинамической стойкости.

ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование однополосных токопроводящих прямоугольных шин на электродинамическую стойкость при коротком замыкании.

2. Выполнена проверка соответствия условиям электродинамической стойкости токопроводящих шин прямоугольного сечения $10 \times 0,6$ см из алюминиевого сплава с модулем упругости $E = 7 \cdot 10^{10}$ Па, которые обращены друг к другу узкими сторонами.

3. Получены зависимости максимального напряжения в материале шин σ_{\max} и нагрузки на изоляторы R_{\max} для различной длины пролета l , а также для различной ширины b и длины h шины. Значения максимального напряжения в материале шин σ_{\max} и нагрузки на изоляторы R_{\max} не превышают предельно допустимых значений соответственно: $\sigma_{\max} < 89,2$ МПа, $R_{\max} < 4500$ Н.

4. Установлено, что геометрические параметры изоляторов и токопроводящих шин, оказывают существенное влияние на максимальное напряжение в материале шин и нагрузки на изоляторы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Герасименко А.А., Федин В.Т. 2014. Передача и распределение электрической энергии. М.: Кнорус, 648.
2. Васильев А.А., Долин А.П., Кудрявцев Е.П. 1976. Приближенный расчет шин и опорных изоляторов на электродинамическую стойкость при коротких замыканиях. Известия вузов. Электромеханика. № 7, 797-800.
3. Долин А.П. 1978. Влияние параметров опор на электродинамическую стойкость шинных линий. Промышленная энергетика. № 12, 26-29.
4. Долин А.П. 1978. Инженерный расчет двухполосных шин на электродинамическую стойкость. Известия вузов. Энергетика. № 1, 3-8.
5. Долин А.П. 2005. Расчет электродинамической стойкости и других параметров жесткой ошиновки ОРУ высоких и сверхвысоких напряжений. Научный журнал «Электрические станции». М.: Энергопрогресс. № 4, 49-53.
6. Долин А.П., Егорова Л.Е. 2012. Применение современных шинодержателей в отечественных конструкциях жесткой ошиновки. Журнал «Электроэнергия. Передача и распределение». М.: ООО «Кабель». № 4(13), 64-69.
7. Елгина Г.А., Слободян С.М. 2015. Физическое моделирование влияния замыканий витков на электродинамическую стойкость катушек индуктивности. Электротехника, информационные технологии, системы управления. № 13, 108-113.
8. Кириченко А. 2014. Анализ коэффициента полезного действия электронасосных агрегатов для электротехнологий при использовании винтоканавочных узлов трения. Motrol Motorig

- zation and power industry in agriculture. Volume 16. No 2. Lublin, 67-73.
9. **Красник В.В.** 2011. Эксплуатация электрических подстанций и распределительных устройств. М.: НЦ ЭНАС, 320.
 10. **Кудрявцев Е.П., Долин А.П., Васильев А.А.** 1975. Методика расчета шин и опорных изоляторов распределительных устройств напряжением до 35 кВ на электродинамическую стойкость. Промышленная энергетика. № 11, 36-39.
 11. **Кудрявцев Е.П., Долин А.П.** 1977. Методика расчета электродинамической стойкости токопроводов напряжением 110 кВ и выше с учетом податливости опор. Электричество. № 5, 15-19.
 12. **Липчук В., Гнатышин Л.** 2013. Уровень механизации производственных процессов в фермерских хозяйствах в контексте уравнившегося развития. Motrol. Motorization and power industry in agriculture. Lublin (Poland). Volume 15. No 4, 126-133.
 13. **Неклепаев Б.Н.** 2013. Электрическая часть электростанций и подстанций. СПб.: ВHV, 608.
 14. **Пашенко Ф.Ф., Пикина Г.А.** 2011. Основы моделирования энергетических объектов. М.: Физматлит, 464.
 15. **Петрова В.О.** 2013. Электродинамическая устойчивость высоковольтной изоляции из древесины к воздействию большого импульсного тока молнии: автореф. дис. канд. техн. наук. Харьков: НТУ «ХПИ», 20.
 16. **Плахтырь О.** 2013. Конструктивно-технологические особенности пространственных магнитопроводов трехфазных статических индукционных устройств мощностью до 10000 кВ·А. Motrol. Motorization and power industry in agriculture. Volume 15. No 2. Lublin, 177-183.
 17. **Пономаренко Е.Г.** 2015. Электродинамическая стойкость воздушных линий электропередачи Наука – образованию, производству, экономике: материалы 13-й Международной научно-технической конференции. Т. 1. Минск: БНТУ, 9.
 18. **Сергей И.И., Пономаренко Е.Г., Михалев А.С.** 2010. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. №5, 10-19.
 19. **Скобло Т., Рыбалко И., Сидашенко А., Тихонов А., Науменко А.** 2013. Оценка термических напряжений при восстановлении деталей новым методом наплавки. Motrol. Motorization and power industry in agriculture. Lublin (Poland). Vol. 15. No 7, 19-25.
 20. **Спирidonov Н.Н.** 2015. Режимы работы электрооборудования станций и подстанций. М.: Нестор-История, 256.
 21. **Файбисович Д.Л., Карапетян И.Г., Шапиро И.М.** 2012. Справочник по проектированию электрических сетей. М.: НЦ ЭНАС, 376.
 22. **Ярымбаш Д.С.** 2014. Особенности расчета электродинамической стойкости шихтованных шинных пакетов короткой сети печи графитации. Вестник СевНТУ. Серия: Механика, энергетика, экология. Севастополь: Изд-во СевНТУ. Вып. 147, 131-136.
 23. **Kamarol Mohamad, Ishak Dahaman, Masri Syafrudin.** 2011. Study on the Electromagnetic Force Affected by Short-Circuit Current in Vertical and Horizontal Arrangement of Busbar System. Paper of International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering. Pahang, Malaysia, 196-200.
 24. **Kyrychenko O.** 2015. Electrodynamic stability of isolators and bus bars in a short circuit. Вестник аграрной науки Причерноморья: научно-теоретический журнал. Николаев. Вып. 3(73), 192-199. (Украина).

INFLUENCE OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF ISOLATORS AND BUS BARS ON ELECTRODYNAMIC STABILITY IN A SHORT CIRCUIT

Summary. As a result of the review of the scientific publications devoted to the analysis of the electrodynamic stability of isolators and bus bars the most convenient analytical method of calculation is selected. The research of the influence of the geometric parameters of isolators and single-lane bus bars on the electrodynamic stability in a short circuit is conducted using this analytical method. The characteristics obtained for the maximal tension in bus bar and for isolator's load are checked for conformity with the conditions of electrodynamic stability.

The calculation algorithm of the research of the influence of the geometric parameters of isolators and bus bars on the electrodynamic stability in a short circuit is considered.

As an example the electrodynamic stability in a short circuit of the single-lane bus bars with rectangular cross-section $10 \times 0,6$ cm is investigated. Bus bars material is an aluminum alloy with the elasticity modulus $E = 7 \cdot 10^{10}$ Pa. The bus bars are placed at a distance $a = 0,7$ m (between narrow sides of the bus bars). The three-phase short circuit current is $i = 87$ kA, the time constant is $T_a = 0,05$ s.

The calculation and functional dependences of own bus frequency f , dynamic coefficient η , maximal tension in bus bars material σ_{\max} and isolator's loads R_{\max} for different span's length l are obtained.

Moreover the functional dependences of moment of inertia J , resisting moment W , own bus frequency f , dynamic coefficient η , maximal tension in bus bars material σ_{\max} and isolator's loads R_{\max} for a different thickness and length of single-lane rectangular bus bars are obtained.

The results of the analysis show the correctness of the chosen geometric parameters of single-lane rectangular bus bars and isolators for the electrodynamic stability in a short circuit. The conditions of electrodynamic stability are observed for all ranges of values.

Key words: bus bar, isolator, short circuit, electrodynamic stability, maximum tension, isolator's load.