

УДК 621.3

**Программные комплексы для механического
и электродинамического расчёта гибких проводников**

Плешко Д. Ю., Федосевич Э.А.

Научный руководитель – д.т.н., профессор СЕРГЕЙ И. И.

Проблема электродинамических воздействий токов короткого замыкания на гибкие провода электроустановок энергосистем стала особенно актуальной к концу 70-х годов, когда проводилось проектирование электроснабжения и непрерывно наращивались мощности электростанций, проектировались распределительные устройства с сокращенными габаритами, велись исследования компактных воздушных линий электропередачи повышенной пропускной способности со сближенными фазами. Это инициировало разработку методов математического моделирования и вычислительного эксперимента для исследования динамики их токоведущих конструкций с гибкими проводами при коротком замыкании.

В электроустановках высокого напряжения электроснабжения энергосистем широко применяются токоведущие конструкции с гибкими проводами. Особенностью их динамики является недопустимое сближение, и даже схлестывание соседних фаз в результате электродинамического действия токов КЗ, сопровождающегося ударными нагрузками на конструктивные элементы РУ и воздушных линий электропередач. Электродинамические воз действия больших токов КЗ – ключевые факторы, влияющие на выбор геометрических размеров и механической прочности токоведущих конструкций с гибкими проводами. Согласно ПУЭ «большими» для гибких проводов являются токи КЗ, имеющие величину более 20 кА. Их существующие уровни превысили указанное значение не только в сетях высокого, но и сверхвысокого напряжения.

Динамика токоведущих конструкций с проводами представляет собой движение упругой многопролетной и многокомпонентной механической системы под воздействием электродинамических усилий (ЭДУ). Изменение взаимного положения проводов влияет на величину и закон распределения по ним ЭДУ. Движение проводов описывается на основе законов и теорем механики. ЭДУ определяются по законам электротехники. При выборе расчетной модели вводятся допущения, идеализирующие провод. Ему придаются свойства и качества, облегчающие решение задачи динамики. В зависимости от степени идеализации провода методы расчета его динамики при КЗ подразделяются на три группы:

- упрощенные, с несколькими степенями свободы провода;
- приближенные, учитывающие дискретное распределение его масс;
- численные методы, учитывающие непрерывное распределение масс.

Упрощенные методы базируются на представлении провода сосредоточенной массой с одной или несколькими степенями свободы и сводятся к решению обыкновенных дифференциальных уравнений. Наиболее простым из них и широко применяемым на практике является метод физического маятника. В нем провод представляется абсолютно твердым телом, все точки которого лежат в одной плоскости, а провода фаз расположены горизонтально. Для повышения точности расчета вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие упругое и температурное удлинение проводов, изменение формы проводов при КЗ, упругую податливость опорных конструкций. Влияние изменения кривой провисания провода на его максимальные отклонения при КЗ учитывается путем его преобразования в равнобедренный треугольник. Учет упругих удлинений провода базируется на законе Гука.

Упругость опорных конструкций вводится невесомой пружиной между точкой подвеса и стержнем маятника. Температурное удлинение учитывается для адиабатического нагрева, исходя из действующего значения тока КЗ. При расчете наибольшего отклонения провода во время свободного движения предполагается, что после отключения КЗ провод движется в

противоположную сторону и отклоняется на такое же расстояние, что и при вынужденном движении. По- существу, этот метод пригоден лишь для частных случаев расположения проводов при приближенной оценке максимальных отклонений и тяжений проводов без учета конструктивных элементов распределительных устройств (РУ) и воздушных ЛЭП.

Профессор Кудрявцев Е. П. применял расчетную модель провода с одной степенью свободы в виде абсолютно твердого и упругого стержня с осью, очерченной по цепной линии. Для описания динамики стержня использованы уравнения Лагранжа второго рода относительно угловой координаты провода.

Кудрявцевым Е. П. составлены многочисленные номограммы, облегчающие определение критериев электродинамической стойкости гибких проводов электроустановок. Однако, представление провода сосредоточенной массой ограничивает возможности упрощенных методов в решении задач динамики проводов при КЗ. Они применимы лишь для частного случая расположения проводов и не могут достоверно учесть влияние различных конструктивных элементов РУ и воздушных ЛЭП.

К приближенным методам расчета относятся методы математического маятника и веревочного многоугольника. Несмотря на простоту и физическую наглядность, метод веревочного многоугольника не имеет строгого обоснования по количеству выбираемых узлов многоугольника, что может привести к искажению результата расчета.

Для упрощения расчетов динамики расщепленной фазы в качестве расчетной схемы большинство исследователей принимают подпролет между двумя соседними распорками. Влиянием ЭДУ от соседних фаз и движением распорок на параметры динамики фазы пренебрегают и оценивают только влияние электродинамического внутрифазного взаимодействия на $T_{1\max}$ и силу сжатия распорок.

Другим приближенным методом расчета $T_{1\max}$ является энергетический метод, предложенный канадскими учеными Крэйгом Д. Б. и Фордом Ж. Л. Энергия деформации проводов, а также потенциальная и кинетическая энергия поддерживающих конструкций во время предельного стягивания проводов фазы после схлестывания приравниваются к работе электромагнитных сил за время их схлестывания. При вычислении этой работы принимается, что ток за рассматриваемый промежуток времени не изменяется и остается равным среднеквадратичному току. Допускается, что провода после схлестывания неподвижны и лежат на оси расщепленной фазы.

В основу численных методов положены расчетные модели провода с непрерывным распределением масс. При этом наибольшее применение получила гибкая упругая нить. При таком подходе выполняется точный расчет сложных токоведущих конструкций с проводами, результаты которого совпадают с опытными данными, и вычисляются динамические характеристики любой точки провода. Поэтому численные методы и составленные на их основе компьютерные программы рекомендованы для решения проектных задач. При численном решении системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающей движение проводов, применяют методы конечных элементов либо конечных разностей. Решение полученных при этом конечно-разностных алгебраических уравнений производится на каждом шаге по времени итерационными методами.

Гибкие провода РУ и воздушных ЛЭП представляют собой пространственную систему криволинейных проводников, взаимное положение и форма которых под действием ЭДУ непрерывно изменяются. Расчет ЭДУ в такой системе проводников представляет собой сложную и трудоемкую задачу. Существующие методы расчета ЭДУ в системе гибких проводов основаны на законе Био-Савара-Лапласа для бесконечно тонких прямолинейных проводников. Методы расчета ЭДУ в системе гибких проводов можно подразделить на две группы. К первой следует отнести более простые методы, основанные на допущении неизменности прямолинейной формы проводов в процессе КЗ. При этом может учитываться лишь изменение расстояния между взаимодействующими проводами. В основу этих методов

положена формула для вычислений ЭДУ между бесконечно длинными параллельными проводниками. Ко второй группе относятся методы, которые приближенно учитывают криволинейность провода. Провод при этом заменяется ломаной линией. ЭДУ на отрезок определяется как результат действия всех отрезков противоположного провода. В качестве основного выражения для расчета ЭДУ используется закон Био-Савара-Лапласа для двух отрезков, лежащих в одной плоскости. Этот метод не учитывает пространственное положение провода и его изменение во времени.

Для механического и электродинамического расчёта гибких проводников на кафедре «Электрические станции» Белорусского национального технического университета были разработаны программные комплексы FleBus, Linedys, а также пакет программ MR220.

Программа FleBus «Расчет электродинамического действия токов короткого замыкания на гибкие шины распределительных устройств» предназначена для динамического расчета гибкой ошиновки распределительных устройств (РУ) при двухфазном или трехфазном коротком замыкании.

Расчет может производиться при различном расположении гибких проводов в РУ с учетом упругого и температурного удлинения под действием гололедных и ветровых нагрузок. В расчете учитываются разность высот подвеса, натяжные гирлянды изоляторов, расщепление фазы, а также отпайки (до трех) к электрическим аппаратам с учетом их реального расположения в РУ.

В ходе расчета определяются нагрузки на провода и гирлянды изоляторов; усилия от сборных шин и отпайки на порталы и аппараты; отклонения порталов и аппаратов под действием приложенных усилий; тяжения в сборных шинах и отпайках; траектории движения сборных шин в любой точке пролета; минимальные расстояния между проводами соседних фаз, а также между сборными шинами и отпайками; максимальные отклонения сборных шин и некоторые другие характеристики.

Программа Linedys «Механический и электромеханический расчёт гибких проводников воздушной линии электропередачи» предназначена для механического расчета воздушных ЛЭП в различных климатических режимах; электродинамического расчета воздушных ЛЭП при коротком замыкании. Расчет производится при различном расположении гибких проводов на опоре с учетом упругого и температурного удлинения под действием гололедных и ветровых нагрузок. В расчете учитываются натяжные и подвесные гирлянды изоляторов, расщепление фазы, упругие характеристики опорных конструкций, а также отпайки (до трех) к электрическим аппаратам.

В ходе расчета определяются нагрузки на провода и гирлянды изоляторов; усилия от проводов и отпайки на опорные конструкции и аппараты; отклонения опорных конструкций и аппаратов под действием приложенных усилий; тяжения в проводах и отпайках; траектории движения проводников в любой точке пролета; минимальные расстояния между проводами соседних фаз; максимальные отклонения проводов и некоторые другие характеристики.

Преимущества: при расчете учитываются: разность высот подвеса и другие особенности геометрии пролета; натяжные и подвесные гирлянды изоляторов; жесткость опорных и изолирующих конструкций; расщепление фазы; внутрифазные и междуфазные распорки; действие гололедных и ветровых нагрузок; упругое и температурное удлинения проводников; характеристики короткого замыкания.

В ходе расчета определяются: нагрузки на провода и гирлянды изоляторов; усилия от проводов на опоры; отклонения опор под действием приложенных усилий; тяжения в проводах; траектории движения проводов в любой точке пролета; минимальные расстояния между проводами соседних фаз и максимальные отклонения проводов; нагрев проводов в процессе КЗ; ток электродинамической стойкости пролета.

Пакет программ MR220 предназначен для механического расчета гибких проводов распределительных устройств и воздушных линий.

Преимущества: при расчете учитываются: разность высот подвеса и другие особенности геометрии пролета; натяжные и подвесные гирлянды изоляторов; расщепление фазы; внутрифазные и междуфазные распорки; отпайки (до трех) к электрическим аппаратам.

Работу с программами упрощает встроенная помощь, диагностика исходных данных, наличие каталогов проводов и гирлянд изоляторов, а также возможность их корректировки и обновления.

Основные характеристики: не предъявляет исключительных требований к персональному компьютеру, интуитивно понятный интерфейс.

При расчете учитываются: разность высот подвеса и другие особенности геометрии пролета; натяжные и подвесные гирлянды изоляторов; расщепление фазы; внутрифазные и междуфазные распорки; отпайки (до трех) к электрическим аппаратам.

Работу с программами упрощает встроенная помощь, диагностика исходных данных, наличие каталогов проводов и гирлянд изоляторов, а также возможность их корректировки и обновления.

Литература

1. 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.