

ративном токе с дешунтированием электромагнита отключения. В ряде случаев чувствительность защиты будет определяться током срабатывания дешунтируемого электромагнита отключения.

Направленная токовая защита в двухрелейном исполнении широко применяется в сетях 35 кВ с двусторонним питанием в качестве основной защиты ВЛ, а токовая отсечка – в качестве дополнительной защиты этих ВЛ. Защита выполняется с независимой выдержкой времени и может использоваться как с переменным, так и с постоянным оперативным током в зависимости от мощности и ответственности подстанции. Для этих целей выпускаются комплекты устройств одноступенчатой направленной токовой защиты КЗ-14 на постоянном оперативном токе и КЗ-38 на переменном оперативном токе в двухфазном двухрелейном исполнении с одной выдержкой времени. С их помощью и с помощью других типов комплектов устройств серии КЗ можно выполнять ступенчатые защиты ВЛ.

В сетях напряжением выше 110 кВ с глухозаземленной нейтралью основными защитами от однофазных КЗ приняты в настоящее время направленные токовые защиты нулевой последовательности, которые имеют более высокую чувствительность и быстродействие по сравнению с направленными защитами, включенными на полные токи и напряжения. Они не имеют «мертвой» зоны. На ВЛ, имеющих питание с двух и более сторон, защиты выполняются четырехступенчатыми (панели ЭПЗ-1636, шкаф ШДЭ-2801), на нетупиковых ВЛ 110–220 кВ с односторонним питанием – трехступенчатыми (комплект защиты типа КЭ-15), а на тупиковых ВЛ 110–220 кВ – двухступенчатыми. Первые ступени защит предназначены в основном для работы при КЗ на защищаемой ВЛ или шинах приемной подстанции, а последняя ступень – для дальнего резервирования.

### Литература

1. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1992.
2. Басс Э.И., Дорогунцев В.Г. Релейная защита электроэнергетических систем. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006.
3. Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1998.

УДК 681.3.06

## РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ MATHCAD

*Коваль А.А.*

Научный руководитель – **КЛИМКОВИЧ П.И.**

Использование компьютера при решении различного рода задач позволяет избежать сложных вычислений и сосредоточиться на анализе результатов и выборе оптимальных параметров. Выбор MathCAD в качестве средства решения задач объясняется его простотой и наглядностью, большим количеством встроенных функций, наличием численного и символьного процессоров. Наличие графического и текстового редакторов дают возможность готовить технические документы непосредственно в оболочке пакета.

Главное достоинство MathCAD – простота и удобство вычислений. Этому принципу должны быть подчинены все вычисления в MathCAD [1].

Что касается численных вычислений, то здесь MathCAD успешно справляется с поставленной задачей. Однако, в системе MathCAD имеются недоработки, ограничивающие применение системы в инженерной практике. Это ограничения при использовании размерностей в расчетах, при решении дифференциальных уравнений, при анализе экспериментальных данных. Совершенно недооценен создателями системы MathCAD раздел программирования, находящийся в зачаточном состоянии, но даже в таком виде с использованием MathCAD можно запрограммировать задачу любой сложности [2].

Следует составлять расчетные программы в общем виде, позволяющем решать целый класс подобных задач, изменяя исходные данные и параметры функций; использовать в работе векторные, матричные обозначения, знаки суммирования и произведения, что приводит к компактности и простоте расчетов [1].

В инженерной практике часто требуется рассчитать геометрические параметры того или иного сечения, влияющие на его прочностные или жесткостные характеристики. Для этих целей можно использовать программный пакет MathCAD. В задаче требуется найти положение главных центральных осей и главные моменты инерции для произвольного сечения, ограниченного известными функциями рисунок 1.

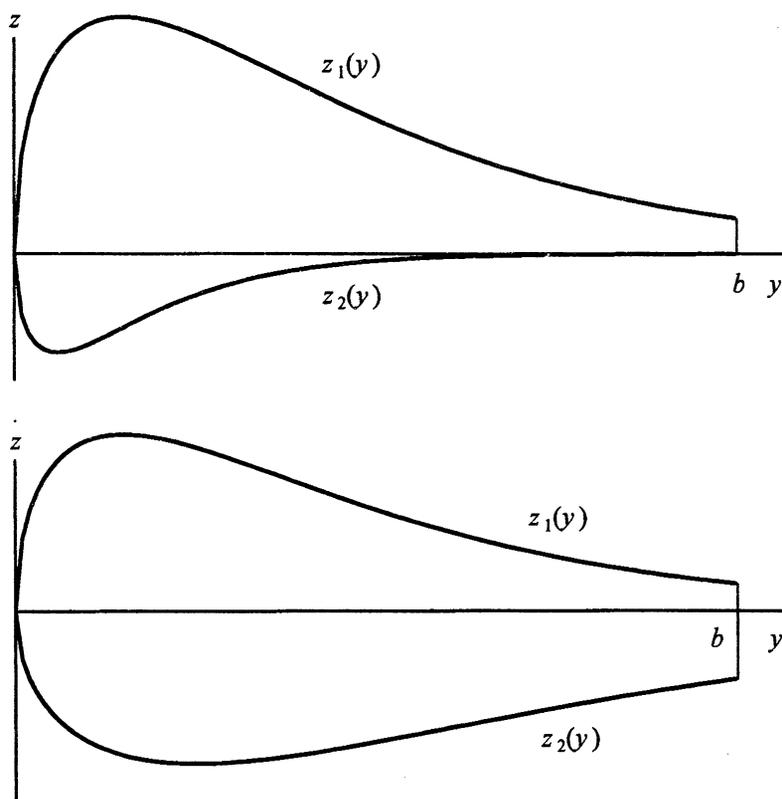


Рис. 1

Вычисление геометрических характеристик сечения производится с помощью прямого использования формул, определяющих статические моменты, осевые и центробежные моменты инерции и др. Для этого сводятся интегралы к повторным, рассчитав пределы интегрирования (область сечения ограничена двумя кривыми  $z_1(y)$  и  $z_2(y)$  и вертикальной прямой, расположенной на известном расстоянии от оси  $z$ ).

На первом этапе находится положение центра тяжести сечения  $O_C$ . Сначала вычисляем площадь области  $F$  и статические моменты  $S_y$  и  $S_z$ . Для этого используются

функции кривых, ограничивающих сечение сверху и снизу. Выражения для определения площади и статических моментов будут следующие

$$F(a, b) = \int_0^b \int_{z_2(y)}^{z_1(y)} 1 dz dy;$$

$$S_z(a, b) = \int_0^b \int_{z_2(y)}^{z_1(y)} y dz dy;$$

$$S_y(a, b) = \int_0^b \int_{z_2(y)}^{z_1(y)} z dz dy.$$

Координаты  $y_C$  и  $z_C$  центра тяжести  $O_C$  определяются по формулам

$$y_C(a, b) = \frac{S_z(a, b)}{F(a, b)};$$

$$z_C(a, b) = \frac{S_y(a, b)}{F(a, b)}.$$

По полученным координатам строятся центральные оси исследуемого сечения. Далее вычисляются осевые и центробежные моменты инерции по выражениям:

$$J_z(a, b) = \int_0^b \int_{z_2(y)}^{z_1(y)} y^2 dz dy;$$

$$J_y(a, b) = \int_0^b \int_{z_2(y)}^{z_1(y)} z^2 dz dy;$$

$$J_{yz}(a, b) = \int_0^b \int_{z_2(y)}^{z_1(y)} yz dz dy.$$

Определяются моменты инерции сечения относительно центральных осей:

$$J_{yC}(a, b) = J_y(a, b) - z_C(a, b)^2 F(a, b);$$

$$J_{zC}(a, b) = J_z(a, b) - y_C(a, b)^2 F(a, b);$$

$$J_{yzC}(a, b) = J_{yz}(a, b) - y_C(a, b)z_C(a, b)F(a, b).$$

Далее вычисляем главные моменты инерции  $J_{z1}$  и  $J_{y1}$  в системе главных центральных осей:

$$J_{y1}(a, b) = \frac{J_{yC}(a, b) + J_{zC}(a, b)}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(J_{yC}(a, b) - J_{zC}(a, b))^2 + 4J_{yzC}(a, b)^2};$$

$$J_{z1}(a, b) = \frac{J_{yC}(a, b) + J_{zC}(a, b)}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(J_{yC}(a, b) - J_{zC}(a, b))^2 + 4J_{yzC}(a, b)^2}.$$

Находится угол  $\alpha_0$ , на который необходимо повернуть систему координат так, чтобы она совпала с главными центральными осями инерции

$$\alpha_0(a, b) = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{2J_{yzC}(a, b)}{J_{yC}(a, b) - J_{zC}(a, b)} \right).$$

Положение главных осей задаётся выражениями:

$$z_{1z}(y) = \tan(\alpha_0(a, b))(y - y_C(a, b)) + z_C(a, b);$$

$$z_{2z}(y) = - \left( \frac{1}{\tan(\alpha_0(a, b))} \right) (y - y_C(a, b)) + z_C(a, b).$$

Приведенные выше элементы файла могут быть объединены в программный модуль, позволяющий в интерактивном режиме изображать сечение и систему главных центральных осей при произвольных значениях исходных данных.

### Литература

1. Макаров Е.Г. Сопротивление материалов на базе MathCAD. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004.
2. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в MathCAD. – СПб.: Питер, 2003.

УДК 621.311.018.782.3

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ПО СОСТАВЛЕНИЮ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ НЕСИММЕТРИИ

*Кочкин М.Н.*

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент БУЛАТ В.А.

Надежность работы электрической системы и ее отдельных параметров в значительной степени зависит от того, насколько правильно и полно при ее проектировании учтены опасные проявления переходных процессов.

Наиболее распространенными видами коротких замыканий (КЗ) в трехфазных электрических сетях являются следующие несимметричные КЗ: двухфазное КЗ; одно- и двухфазные КЗ на землю.

Расчеты несимметричных КЗ, также как и расчеты других несимметричных режимов в электрических системах (обрывы проводов; работа по системе «два провода – земля» и т. п.), удобно производить с помощью метода симметричных составляющих.

При расчетах несимметричных КЗ составляются схемы замещения отдельных последовательностей, в каждую из которых входят все элементы, по которым при данном несимметричном КЗ проходят токи соответствующих последовательностей. Составление схем замещения прямой и обратной последовательностей не вызывает особых затруднений. Составление же схем замещения нулевой последовательности, необходимых при расчетах токов коротких замыканий на землю, особенно для студентов изучающих дисциплину «Переходные процессы в электроэнергетических системах» и начинающих проектировщиков вызывает определенные трудности вследствие того, что система токов нулевой последовательности резко отличается от систем токов прямой и обратной последовательностей. В эту схему вводятся только те элементы расчетной схемы, по которым могут протекать токи нулевой последовательности, а именно: системы с заземленными нейтральями, силовые автотрансформаторы и трансформаторы с заземленными нейтральями, линии электропередач (ЛЭП) и кабели соединяющие их. Ее конфигурация определяется схемой соединения обмоток силовых трансформаторов и генераторов.

В данной программе сделана попытка, научить будущих инженеров-электриков составлять схемы нулевой последовательности при выполнении расчетов КЗ на землю в сложных схемах. С помощью программы пользователь имеет возможность составить схему энергосистемы любой сложности и указать расчетную точку несимметричного КЗ. Для составления расчетной схемы в базе данных пользователю предоставлены различные элементы электрической цепи: трансформаторы и автотрансформаторы с раз-