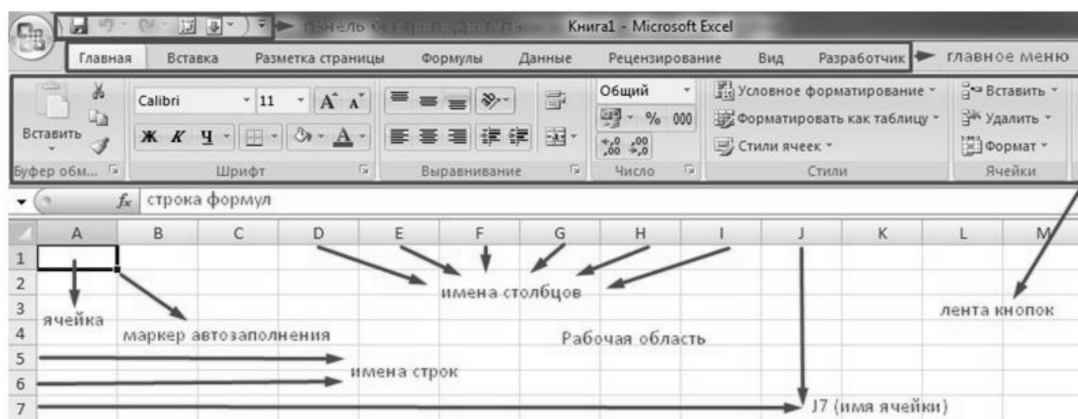


О.И. Александров, доц., канд. техн. наук;  
 Д.В. Островская, асп. (БГТУ, г. Минск);  
 Т.Е. Жуковская (БНТУ, г. Минск)

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБРАБОТКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО РЕЖИМАМ БЕЛОРУССКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Уравнения узловых напряжений традиционно применяются при расчетах установившихся режимов электрических систем. Процедура формализуется на основе аналитического представления конфигурации схемы замещения с помощью топологических матриц инцидентий. Из законов Ома и Кирхгофа вытекает метод формирования математических моделей установившегося режима узловых напряжений, который является основным методом, используемым для составления системы уравнений установившегося режима. Чтобы получить такую систему, достаточно для каждого из узлов электроэнергетической системы записать уравнения первого закона Кирхгофа, а затем токи ветвей заменить с помощью напряжений прилежащих узлов.

Для определения текущих установившихся режимов энергосистемы РБ был разработан алгоритм расчета высоковольтной сети Белорусской энергосистемы. Схема содержит 100 узлов и 100 ветвей. Для кодировки используется программа «МО excel». Книга Excel состоит из листов. Лист – рабочая область в окне. Его элементы представлены и подписаны на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Рабочая область Excel. Топологическая матрица инцидентий**

1. Размер топологической матрицы зависит от числа её ветвей и узлов, а также способа соединения ветвей между собой. Число столбцов равно числу ветвей, а число строк – числу узлов. В результате образуется матрица токов  $M$  размером  $|x \times y|$ , где  $x$  – количество строк (узлов) и  $y$  – количество столбцов (ветвей). Схема основной электрической сети Белорусской энергосистемы представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Схема высоковольтной электрической сети  
Белорусской энергосистемы**

2. Ниже матрицы  $M$  составляется матрица сопротивлений  $Z$ , значения активных сопротивлений ветвей которой вписываются по диагонали. В результате получаем диагональную матрицу размером  $|x \times y|$ .

3. Проводится транспонирование матрицы токов  $M$ . Транспонирование матрицы – это операция над матрицей, при которой ее строки и столбцы меняются местами. Для этой операции в «МО excel» существует специальная функция ТРАНСП() или англ. TRANSPOSE.

Матрица « $M$ » имеет размер  $|x \times y|$ , после ее транспонирования в матрицу  $MT$  она будет иметь размер  $|y \times x|$ . Поочередно выполняются следующие комбинации.

а) В строке формул (ниже матрицы сопротивлений ветвей) необходимо ввести формулу ТРАНСПО).

б) Далее необходимо вставить запрашиваемый массив. Для этого устанавливается курсор в поле и, зажав левую кнопку мыши, выделяется весь диапазон матрицы  $M$ .

в) В ячейке, которая предназначена для ввода результата, отображается некорректное значение в виде ошибки «#ЗНАЧ!». Это связано с особенностями работы операторов массивов.

Что бы исправить эту ошибку, выделяется диапазон ячеек, в котором число строк должно быть равным количеству столбцов первоначальной матрицы « $M$ », а число столбцов – количеству строк. Подобное соответствие очень важно для того, чтобы результат отобразился корректно. При этом, ячейка, в которой содержится выражение «#ЗНАЧ!» должна быть верхней левой ячейкой выделяемого массива и именно с неё следует начинать процедуру выделения, зажав левую кнопку мыши.

г) После того, как проведено выделение, устанавливается курсор в строку формул сразу же после выражения оператора ТРАНСП, ко-

торое должно отразиться в ней. После того, чтобы произвести вычисления, нужно нажать комбинацию Ctrl+Shift+Enter.

д) После этих действий матрица отобразилась так, как необходимо, то есть, в транспонированном виде МТ с размерами  $|y \times x|$ .

4. Строится диагональная матрица проводимостей  $Y1$  ( $Y1 = Z^{-1}$ ), которая является обратной матрицей сопротивлений всех ветвей  $Z$ . Вычисление обратной матрицы в «МО excel» возможно если первичная матрица является квадратной, т. е. количество строк равно числу столбцов  $|y \times y|$ . Для вычисления применяется функция массива МОБР. Прежде всего вычисляется имеет ли первичный диапазон обратную матрицу или нет. Для этого используется функция МОПРЕД.

Выделяется любая пустая ячейка на листе, куда будут выводиться результаты вычисления. Нажав на кнопку «Вставить функцию», находится функция «МОПРЕД» и нажимается «ОК».

Далее необходимо вставить запрашиваемый массив. Для этого устанавливается курсор в поле и, зажав левую кнопку мыши, выделяется весь диапазон матрицы  $Z$  на листе.

Программа производит расчет определителя, который должен быть не тождественен нулю. Это одно из условий для вычисления обратной матрицы, которое позволяет сказать, что у данной матрицы существует обратная.

Теперь выполняется непосредственный расчет обратной матрицы. Выделяется ячейка, которая должна стать верхней левой ячейкой обратной матрицы. Клавиша: «Вставить функцию», размещенную около строки формул. Определяется функция «МОБР» и активизируется «ОК».

Далее вставляется запрашиваемый массив. Для этого устанавливается курсор в поле и, зажав левую клавишу мыши, выделим диапазон матрицы  $Z$ .

В результате появляется значение только в одной ячейке, в которой была формула. Однако нужна полноценная обратная функция, поэтому следует скопировать формулу в другие ячейки. Выделяется диапазон, равнозначный по горизонтали и вертикали исходному массиву данных. Жмется функциональная клавиша F2, а затем набирается комбинация Ctrl+Shift+Enter. Обратная матрица вычислена. Получена матрица размером  $|y \times y|$ .

5. Далее определяется матрица узловых собственных и взаимных проводимостей узлов  $Y2$ . Для этого перемножается матрица  $M$  на матрицу  $Y1$ . Полученный результат умножается на транспонированную матрицу МТ. Получаем уравнение  $Y2 = (M \cdot Y1) \cdot МТ$ .

Для умножения матриц в «МО excel» существует функция МУМНОЖ().

В этом окне имеется два поля для ввода адресов матричных массивов. Ставится курсор в поле «Массив1» и, зажав левую кнопку мыши, выделяется вся область первой матрицы  $M$ . После этого её координаты отобразятся в поле. Ставится курсор в поле «Массив2» и аналогичным образом выделяется диапазон второй матрицы. Далее жмем комбинацию кнопок  $\text{Ctrl}+\text{Shift}+\text{Enter}$ .

Полученную матрицу еще раз аналогичным способом необходимо умножить на транспонированную матрицу  $MT$ . В результате получена матрица проводимостей узлов  $Y2$  размером  $|x \times x|$ .

6. Вычисляется матрица узловых собственных и зонных сопротивлений  $Z2$ . Сопротивление узлов  $Z2$ , есть обратная матрица проводимостей узлов, т. е.  $Z2 = Y2^{-1}$ . Следовательно, необходимо провести действия, аналогичные пункту 4, однако на этот раз можно исключить функцию «МОПРЕД».

Для этого выделяем любую пустую ячейку на листе, куда будут выводиться результаты вычисления. Жмется кнопка «Вставить функцию», размещенную около строки формул. Ищется «МОБР» и нажимается «ОК». Далее необходимо вставить запрашиваемый массив. Для этого устанавливаем курсор в поле и, зажав левую кнопку мыши, выделяется весь диапазон матрицы  $Y2$  на листе. Далее выделяется диапазон, равнозначный по горизонтали и вертикали исходному массиву данных. Жмется функциональная клавиша  $F2$ , а затем набирается комбинация  $\text{Ctrl}+\text{Shift}+\text{Enter}$ . Матрица сопротивлений узлов найдена и имеет размер  $|x \times x|$ .

7. Далее вычисляется матрица распределения токов  $C$ . Для определения матрицы токов сначала умножается матрица проводимость ветвей  $Y1$  на матрицу транспонированную  $MT$  с помощью функции  $\text{МУМНОЖ}()$  (аналогично П. 5). Полученная матрица размером  $|y \times x|$  снова умножается с помощью функции  $\text{МУМНОЖ}()$  на матрицу сопротивлений узлов  $Z2$ . В итоге получается матрица распределения токов  $C$  размером  $|y \times x|$ .

8. По имеющимся данным мощностей в узлах составляется столбцовая матрица потоков мощностей в узлах  $S_{уз}$ . В итоге получается матрица размером  $|x \times 1|$ .

9. Для расчета матрицы мощностей в ветвях  $S$  выделяется свободная ячейка и с помощью функции  $\text{МУМНОЖ}()$  умножаем матрицы. В ячейку «Массив1» вставляем диапазон значений матрицы распределения токов  $C$ , а в ячейку «Массив2» - диапазон значений матрицы потоков мощностей в узлах  $S_{уз}$ . Получается матрица потоков мощностей в ветвях  $S$  размером  $|y \times 1|$ .

С использованием приведенной методики могут выполняться расчеты реальных режимов для Белорусской энергосистемы, рассчитываться оптимальное распределение потоков мощности в высоко-

вольтной сети Белорусского энергообъединения для различных режимных состояний энергосистемы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Основные технические требования к параллельно работающим энергосистемам стран СНГ и Балтии. Правила и рекомендации по регулированию частоты и перетоков: утв. решением ЭЭС СНГ от 12.10.2015. – Режим доступа: <http://energo-cis.ru/rumain4223/9>. – Дата доступа: 16.09.2022.

2. Александров, О. И. Оценка балансовой надежности дефицитной энергосистемы / О. И. Александров, Н. В. Радоман, Т. Е. Жуковская // Энергетика. – 2013. – № 3. – С. 9–18.

3. Концепция регулирования частоты и перетоков в энергообъединении стран СНГ и Балтии [Электронный ресурс]: утв. решением ЭЭС СНГ от 27.10.2005. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200118098>. – Дата доступа: 16.09.2022.

УДК 621.311.1

О.И. Александров, доц., канд. техн. наук;

А.А. Кадыко, асп. (БГТУ, г. Минск);

Т.Е. Жуковская (БНТУ, г. Минск)

#### **РАЦИОНАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ СЕЗОННЫХ РЕЖИМОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ БЕЛОРУССКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

В современных условиях перехода к рыночным отношениям многих предприятий неизменно возрастает роль оптимизации расчетов в энергетике. Переход от директивных методов распределения топлива к экономическим при неуклонном росте цен на энергоносители влечет за собой ряд принципиальных трудностей и предполагает решение комплекса взаимосвязанных задач. К их числу относятся: оптимизация распределения активной мощности между электростанциями энергосистемы с учетом потерь в сети и удельных расходов топлива; учет ограничений по поставкам топлива; режимно-экономическое взаимодействие генерирующих и потребляющих предприятий с учетом регулирующего эффекта нагрузки; выравнивание графиков нагрузки энергосистемы и промышленных предприятий; оперативное управление электропотреблением с оптимизацией режима работы системных потребителей-регуляторов.

В качестве одного из основных критериев оценки рационального использования топливно-энергетических ресурсов на всех стадиях