

УДК 004

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СЕТИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Цебровский А.Д., Шарапова М.В.

*Амурский государственный университет*

[artem.tsskiy@gmail.com](mailto:artem.tsskiy@gmail.com), [sharapova.95@mail.ru](mailto:sharapova.95@mail.ru)

В статье приведен краткий обзор существующих программно-вычислительных комплексов, выполнен выбор алгоритма для разрабатываемого ядра, проведены оптимизационные мероприятия для ускорения работы выбранного алгоритма. В конце доклада приводится сравнение результатов работы разработанного ядра с существующим ПВК RastrWin 3 на примере части электрической сети Южно-Якутского энергорайона.

**Ключевые слова:** Установившиеся режимы, расчет режимов, комплекс, RastrWin, алгоритмы

## DEVELOPMENT OF SOFTWARE COMPLEX FOR CALCULATION OF THE STEADY ELECTRICAL POWER NETWORK IN REAL TIME

Tsebrovskiy A.D., Sharapova M.V.

The article gives a brief overview of existing software and computer systems, made the choice of algorithm for the development kernel, carried out various actions to speed the selected algorithm. At the end of the report compares the results of the work developed core with the existing software complex RastrWin 3 on the example of the electric network of the southern Yakutian power district.

**Keywords:** Steady state, state evaluation, complex, RastrWin, algorithms.

Назначением расчетов режимов электрических сетей являются: выбор схемы и параметров сети, в т. ч. определение загрузки элементов сети и соответствия их пропускной способности ожидаемым потокам мощности, а также выбор сечений проводов и мощностей трансформаторов; выбор средств регулирования напряжения, компенсации реактивной мощности и оптимизации потокораспределения а так же ряд других задач.

В настоящее время существуют различные программные комплексы для расчёта установившихся режимов. Рассмотрим некоторые из них, выделив достоинства и недостатки.

Программный комплекс EnergyCS Режим предназначен для выполнения расчетов установившихся режимов при проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем любой сложности, а также для решения смежных задач.

---

Достоинства комплекса:

- Проведение множества расчетов при проектировании сетей любой сложности
- Встроенный графический редактор с собственной базой обозначений элементов схем
- Ввод данных в графическом виде и использование справочной базы электротехнического оборудования
- Исключена возможность ошибки при определении параметров схем замещения
- Параметры расчетной модели и результаты расчета доступны в любой момент, представляются как в графическом, так и в табличном виде
- Интеграция в САПР с любым графическим ядром

К недостаткам комплекса можно отнести отсутствие возможности расширения функционала сторонними разработчиками.

LineXL - программа по расчету режимов электрических сетей 0.4 – 10 кВ интегрированная в Microsoft Excel. Сети 6, 10 кВ наиболее подвержены изменениям, как по параметрам сети, так и по ее структуре. Учитывая возможности Microsoft Excel как удобного табличного редактора, LineXL позволяет существенно сократить время на создание, редактирование расчетной модели сети и при этом производить расчеты сетей. Данный комплекс не предназначен для расчёта режимов сетей напряжением выше 10 кВ и сетей с двухсторонним питанием.

Программный комплекс RastrWin предназначен для решения задач по расчету, анализу и оптимизации режимов электрических сетей и систем.

Особенности программы:

- расчет установившихся режимов электрических сетей произвольного размера и сложности, любого напряжения (от 0.4 до 1150 кВ). Полный расчет всех электрических параметров режима (токи, напряжения, потоки и потери активной и реактивной мощности во всех узлах и ветвях электрической сети);
- расчет установившихся режимов с учетом частоты;
- проверка исходной информации на логическую и физическую непротиворечивость;
- эквивалентирование электрических сетей;
- оптимизация электрических сетей по уровням напряжения, потерям мощности и распределению реактивной мощности.

Несмотря на все достоинства ПВК RastrWin, имеется существенный недостаток – небольшая гибкость использования ПВК в условиях развития средств передачи и обработки данных. Слабая

---

реализация программного интерфейса сильно ограничивает использование собственных наработок и затрудняет введение в эксплуатацию новых методов обработки данных.

В связи с указанным недостатком было принято решение имплементировать собственный расчетный модуль. Решение основывается на следующих доводах:

1. Использование модуля в качестве ядра позволяет создавать более гибкое ПО, собирая необходимые компоненты вместе (каждый компонент хорошо выполняет только одну, свою задачу, не реализуя ничего лишнего)

2. ПО, созданное на базе подобных модулей, будет иметь более гибкий интерфейс и функционал, что позволит использовать один и тот же комплекс в разных службах, лишь нивелировав его под нужды конкретной службы или группы инженеров

В первую очередь необходимо определить начальные условия для разрабатываемого модуля.

1. Единственная задача создаваемого модуля – расчет режима

2. Модуль должен осуществлять расчет установившихся режимов в качестве отправной точки

3. Результат расчета не должен отличаться от такого же расчета в ПВК RastrWin более, чем на  $\pm 5\%$

Теперь, когда условия четко определены, следует выбрать алгоритм для расчета режима.

Алгоритм должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Максимально эффективное использование вычислительных ресурсов ЭВМ

2. Наиболее быстрая сходимость

Оба требования обусловлены необходимостью создать наиболее эффективное и быстрое ядро, на котором будет основываться остальная часть ПО.

В связи с предъявленными требованиями, были рассмотрены алгоритмы Зейделя, Ньютона и его модификации.

Метод Зейделя предполагает вычисление рекуррентных соотношений, созданных путем преобразования уравнений режима электрической сети (баланса токов), записанных в комплексном либо декартовом виде. Метод довольно прост в реализации, однако довольно медленно сходится вследствие большого числа итераций. Ввод ускоряющего коэффициента  $t$  в рекуррентную формулу улучшает его сходимость, однако выбор коэффициента является тонкой работой, неверно выбранный коэффициент приведет к низкой точности расчета. Возможно, использование метода

---

градиентного спуска позволит подбирать подходящий коэффициент  $t$  для каждой итерации, однако подтверждений этому не найдено. Рекуррентное соотношение с коэффициентом ускорения имеет вид:

$$\dot{U}_i^{[p+1]} = \dot{U}_i^{[p]} + t\Delta\dot{U}_i, \quad (1)$$

Метод Ньютона так же является итерационным и предназначен для решения систем нелинейных алгебраических уравнений. Разложение уравнений в ряд Тейлора линеаризует заданные уравнения, ограничиваясь первыми производными. Линеаризованные уравнения, все так же являясь системой, могут быть решены любым удобным методом решения СЛАУ. Все полученные производные организуются в матрицу Якоби, итерационно решается система (2), на каждой итерации определяется значение невязок переменных.

$$W + \frac{dW}{dX} \cdot \Delta X = 0, \quad (2)$$

где  $\frac{dW}{dX}$  – матрица производных  $\frac{\partial W_i}{\partial x_j}$ ,

Уравнения режимов для метода Ньютона могут быть записаны как в форме баланса мощностей, так и в форме баланса токов в полярной системе координат. В среднем, имеет лучшую сходимость, чем метод Зейделя, однако каждая итерация требует большого количества вычислений.

Так как оба алгоритма основываются на системах алгебраических уравнений, у них есть граничные условия, при которых они теряют свою эффективность вплоть до неспособности найти решение систем уравнений за конечное время. Этими условиями являются режимы, близкие к пределу по статической устойчивости, расчет резконеоднородных сетей. По аналогии с методом Зейделя, введение решения, аналогичного коэффициенту ускорения позволяет решать уравнения таких «пограничных» режимов. В методе Ньютона данный коэффициент  $t$  выглядит следующим образом:

$$U_i^{[p+1]} = U_i^{[p]} + t\Delta x_i, \quad i = 1 \dots n, \quad (3)$$

$$\delta_i^{[p+1]} = \delta_i^{[p]} + t\Delta x_{i+n}, \quad i = 1 \dots m. \quad (3.1)$$

Иным решением является использование как линейных, так и квадратичных членов разложения в ряд Тейлора (использование производных второго порядка) – т.н. метод Ньютона второго порядка. Он предусматривает не точное, но приближенное решение системы на каждой итерации. Алгоритмическая сложность этого метода в среднем больше, чем у классического метода

Ньютона в  $2n$  раз, так как объем вычислений соответствует решению двух систем линейных уравнений той же размерности, что и исходная система.

На основании этого, за основу был выбран метод Ньютона, как более точный и быстрый. Однако, это не удовлетворяет требованиям к ядру в области эффективности вычислений и было обнаружено оптимальное и элегантное решение: упрощать метод при нулевом приближении, т.е. использовать постоянную матрицу Якоби, что существенно снижает число вычислительных операций на каждой итерации, не считая первую. Однако, данная оптимизация имеет место только для «легких» режимов, где нет проблем со сходимостью. По умолчанию, все режимы в существующем ядре принимаются как «легкие», но используя эвристические методы в существующих алгоритмах, была реализована еще одна оптимизация. Ее суть в том, чтобы обнаружить неэффективность использования упрощенного алгоритма прямо во время расчета, о чем будет рассказано подробнее ниже.

Рассмотрим более подробно весь алгоритм, имплементированный в ядре.

1. Задается начальное приближение модулей и фаз напряжений. Рекомендуется принимать  $U_i^{[0]} = U_{ном}$ ,  $\delta_i^{[0]} = 0$ .

2. Вычисляются значения функций  $W_i$  (исходные уравнения режима) при данном приближении переменных:

$$W_i = \begin{cases} W_{a,i}, & i = 1 \dots n, \\ W_{p,i-n}, & i = (n+1) \dots 2n, \\ W_{a,i-n}, & i = (2n+1) \dots (n+m). \end{cases} \quad (4)$$

3. Проверка условия

$$|W_i| < \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – заданная точность решения.

Если эти условия выполнены для всех узлов, то расчет заканчивается, и решением является последнее приближение переменных. Если условие (5) не выполнилось хотя бы для одного узла, то осуществляется переход к пункту 4.

На этом шаге на первой итерации делается предположение  $w$ ,  $5 \geq w \geq 10$ , на какой итерации должна быть достигнута сходимость. В случае, если к итерации, равной  $w$  сходимость не достигнута, на каждом последующем шаге будет рассчитываться заново матрица Якоби (т.о. заново запускается метод Ньютона, но со второй итерации (текущие данные используются как первое

приближение)). Данная оптимизация позволила сократить время расчета на 29%, в сравнении с расчетом исключительно классическим методом.

4. Вычисляются компоненты матрицы Якоби  $a_{ij}$  при данном приближении переменных (только для первой итерации).

5. Составляется и решается линейная система (2), которая имеет порядок  $(n + m)$ . Обычно для ее решения используется метод Гаусса.

6. Определяется  $(p+1)$ -е приближение переменных:

$$U_i^{[p+1]} = U_i^{[p]} + \Delta x_i, \quad i = 1 \dots n, \quad (5)$$

$$\delta_i^{[p+1]} = \delta_i^{[p]} + \Delta x_{i+n}, \quad i = 1 \dots m. \quad (6)$$

7. Возврат к шагу (2)

Реализованный алгоритм показывает приемлемые результаты по скорости вычисления, тем не менее, в процессе исследования была обнаружена возможность использовать топологическую особенность электрических сетей, которая отражается в матрице узловых проводимостей, а именно разреженность этих матриц. Самым простым способом получить на основании этого свойства ускорение в расчетах – приведение матрицы узловых проводимостей к виду односвязного списка путем изменения нумерации узлов (сортировки по возрастанию степени вершины графа):

1. Выбирается узел с наименьшей степенью (степенью называется число ветвей, сходящихся в данном узле) или один из таких узлов, если их несколько. Этому узлу присваивается номер 1.

2. Нумеруются узлы, смежные с узлом 1, в порядке возрастания их степеней.

3. То же самое производится для остальных пронумерованных узлов в порядке возрастания их номеров.

Результирующая матрица представляет точно такой же граф, что и исходная, однако имеет ленточный вид, что существенно снижает нагрузку на оперативную память во время работы алгоритма.

Для проверки работоспособности ядра была небольшая часть сети Южно-Якутского энергорайона. Источником электроэнергии взята Чульманская ТЭЦ мощностью 48 МВт. Классы напряжения, представленные на тестовом примере – 110, 35, 10 и 6 кВ. Результаты работы алгоритма и расчета режима в ПВК RastrWin приведены в сводную таблицу 1.

Таблица 1 – Часть результатов расчета режима ПВК RastrWin и разработанным ядром, сведенные в одну таблицу.

Номер узла на схеме	$U_{\text{ном}}$ , кВ	$U_{\text{растр}}$ , кВ	$U_{\text{ядро}}$ , кВ
5	6	6.79	6,95
7	110	114.06	114.42
8	6	6.42	6.58
9	10	10.11	10.37
37	110	105.62	106.02
38	110	104.07	104.91
39	6	5.74	6.17
40	6	5.74	6.17
50	6	6.09	6.15
51	110	115.47	114.87
52	6	6.95	6.49
53	6	6.94	6.52

Как видно из сводной таблицы, напряжения, рассчитанные ядром, не отличаются от напряжений на тех же узлах в расчете в ПВК RastrWin. Время расчета представленной схемы из 54 узлов в среднем равно 52 – 58 мс.

Помимо самого ядра были имплементированы протоколы передачи данных IEC-60870-4-105 и IEC-61850 с целью получения релевантных данных телеметрии для расчета режима. В обоих протоколах реализован только транспортный уровень – минимум, необходимый для получения данных телеметрии.

В результате проделанной работы были достигнуты следующие результаты:

1. Создано ядро, доступное для подключения к другим модулям
2. Проверена его работоспособность на реальном участке сети, находящейся в эксплуатации
3. Имплементированы протоколы передачи данных IEC-60870-4-105 и IEC-61850 для получения данных телеметрии.

Разумным представляется определение дальнейших целей по развитию данного проекта:

1. Создание единой спецификации, описывающей принципы и философию взаимодействия модулей между собой с тем, чтобы другие разработчики создавали консистентные модули и строго придерживались данной спецификации.
2. Реализация блока оптимизации режима существующих энергосетей.
3. Поиск и исправление ошибок в существующем коде.

#### Список литературы

- 1 Аюев, Б.И., Давыдов, В.В., Ерохин П.М., Неуймин В.Г. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах: монография / П.И. Бартоломей – М.: Флинта : Наука, 2008. – 256 с.
  - 2 Гиршин, С.С., Владимиров, Л. В. Методы расчета и оптимизация режимов электроэнергетических систем: конспект лекций / С. С. Гиршин, Л. В. Владимиров. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010.– 48 с.
  - 3 Тимохин, В. А. Автоматизированная информационно-измерительная система контроля учета электроэнергии оптового рынка электроэнергии и мощности ОАО «Орелблэнерго» / В.А. Тимохин // Вести высших учебных заведений черноземья. – 2009. – № 2(16). – С. 96-98.
  - 4 Bieberstein, N. Service-oriented architecture compass: business value, planning, and enterprise roadmap / N. Bieberstein, S. Bose, M. Fiammante. – New York : IBM Press, 2005. – 272 с.
  - 5 Fowler, M. Patterns of enterprise application architecture / M. Fowler. – New York : Addison-Wesley Professional, 2002. – 560 с.
-