

**Алгоритмизация задачи расчёта и анализа
установившихся режимов сложноразветвленных электрических
сетей энергосистем**

Золотой А.А.

Белорусский национальный технический университет

Важнейшей задачей службы режимов электросетевых предприятий является расчёт и анализ установившихся режимов основных электрических сетей имеющих, как правило, сложноразветвленную топологию. Традиционно в Республике Беларусь такие расчёты выполняются с использованием зарубежных программных продуктов высокого уровня таких, как, например, пакета RASTR, разработанного в УПИ (г. Екатеринбург), который много лет успешно эксплуатируется в энергосистемах стран СНГ. При этом на обновление и сопровождение импортных программных продуктов, поддержание их работоспособности неоправданно тратятся государственные валютные средства, в то время как рассматриваемая проблема может быть успешно решена собственными силами и средствами. Кроме того, возникают проблемы при адаптации импортных комплексов в энергосистеме с учётом её структурных особенностей. Следует также добавить, что перечень задач, решаемых на базе расчётов стационарных режимов основных электрических сетей, реализованный в зарубежных программах, не всегда соответствует запросам эксплуатации. Поэтому представляется целесообразным и перспективным разработку собственного программного продукта, способного решать не только задачи расчёта режимов, но и другие технологические задачи электрических сетей. Эксплуатация такой программы, несомненно, будет гораздо дешевле любого импортного аналога.

Автором разработаны и апробированы усовершенствованные алгоритм и программа для расчёта и анализа установившихся режимов сложноразветвленных электрических сетей, основные положения которого приведены ниже. В основу алгоритма положен расчёт напряжений в узлах электрической сети методом Ньютона по параметру. Программная реализация выполнена на языке PASCAL в среде визуального программирования Delphi под Windows и занимает 350К дисковой памяти. Алго-

ритм ориентирован на расчёт электрических сетей больших объемов. Предельный объём рассчитываемой схемы ограничивается исключительно возможностями используемой ЭВМ. Хранение слабозаполненных матриц в процессе расчёта производится в блочно-компактной форме. Решение системы линейных алгебраических уравнений на каждом шаге выполняется методом двойной факторизации с применением оптимальной стратегии исключения неизвестных. Расчёт выполняется без предварительного приведения элементов электрической сети к одной ступени напряжения. Расчёт напряжений нагрузочных узлов проводится как с учётом, так и без учёта статических характеристик нагрузок. Предусмотрена возможность задания статических характеристик нагрузки для каждого узла схемы в виде полинома четвёртой степени или использования типовых характеристик. Если статические характеристики не учитываются, то в расчётах участвуют нагрузки узлов, заданные в исходных данных.

Линии в процессе расчёта представляются полной П-образной схемой замещения, трансформаторы — полной Г-образной схемой замещения с возможностью задания комплексных коэффициентов трансформации.

Система нелинейных уравнений, описывающая стационарный режим работы основной электрической сети, записывается в форме баланса активных и реактивных мощностей в декартовой системе координат. Переменными являются действительные и мнимые составляющие напряжений в узлах электрической сети.

На основании принципиальной схемы электрической сети составляется её эквивалентная схема замещения, содержащая $p+1$ узлов и m ветвей. Обозначим множества узлов и ветвей соответственно как N и V . Множество узлов N состоит из трёх подмножеств $B \cup N$, $P \cup N$ и $Q \delta \in N$ генераторных узлов, на которые работают электростанции или регулируемые источники реактивной мощности (ИРМ), а также подмножества $RQ \in N$ нагрузочных узлов. Подмножества $B \cup$, $P \cup$ и $Q \delta$ отличаются между собой способами моделирования генераторных узлов. Узлы подмножества $B \cup$ моделируются заданием модуля и фазы напряжения. Зависимыми переменными будут генерации активных и реактивных мощностей. Узлы подмножества $P \cup$

моделируются заданием модулей напряжений и генерациями активных мощностей. В качестве зависимых переменных для PU-узлов принимаются генерации реактивных мощностей и фазы напряжений. Узлы подмножества Q δ моделируются заданием фаз напряжений и генерациями реактивных мощностей. Зависимыми переменными здесь будут генерации активных мощностей и модули напряжений. Узлы с заданными P $_i$ и U $_i$ и принадлежащие подмножеству PU, называются узлами *опорными* по напряжению.

Множество ветвей V состоит из подмножества трансформаторов T, T \in V и подмножества линий L, L \in V.

При эксплуатационных расчётах установившихся режимов электрической сети параметры схемы обычно известны. Исключения в отдельных случаях составляют коэффициенты трансформации трансформаторов и автотрансформаторов, допускающие их регулировку, которая должна определяться в процессе расчёта режима. Режим работы сети при заданной схеме и её параметрах полностью определяется параметрами режима.

При расчёте установившегося режима электрической сети со схемой, содержащей n+1 узлов, заданными величинами являются 2n+1 независимых параметров режима. Остальные параметры будут зависимыми и определяются через заданные независимые. Для расчёта режима в схеме должен быть задан хотя бы один Q δ -узел, *балансирующий по активной мощности*, т.е. не имеющий ограничений на генерацию активной мощности, и хотя бы один PU-узел, *балансирующий по реактивной мощности*. Кроме того, по крайней мере, в одном узле необходимо задать модуль напряжения. Такой узел называется *базисным по напряжению*. Очевидно, что в данном случае базисный узел будет совпадать с PU-узлом, балансирующим по реактивной мощности. Обычно в качестве базисного узла и узлов, балансирующих по активной и реактивной мощностям, выбирается один и тот же узел. Такой узел называется *балансирующим* (БУ). В общем случае в схеме может быть задано несколько балансирующих узлов, составляющих подмножество BU множества N. Активная P $_{бу}$ и реактивная Q $_{бу}$ мощности балансирующего узла определяются из условия баланса мощностей в сети, включая потери в ней, которые заранее неизвестны. Поэтому в качестве балансирующего узла необходимо выбрать такой узел, на ко-

торый работает электростанция системы, имеющая мощность, достаточную для покрытия ожидаемой активной и реактивной нагрузок $P_{бу}$ и $Q_{бу}$.

Математически задача может быть описана на основании узловой или контурной модели электрической сети. Исследования ряда научных организаций ближнего и дальнего зарубежья показали, что для моделирования подобных задач наиболее предпочтительной, с разных точек зрения, является узловая модель сети. При математическом моделировании решаемой задачи данная модель была принята автором в качестве основной.

Таким образом, расчёт установившегося режима основной электрической сети сводится к решению системы уравнений установившегося режима (УУР) при следующих исходных условиях:

1) PQ-узлы (нагрузочные)

$$\begin{cases} P_p - \bar{P}_p = 0; \\ Q_p - \bar{Q}_p = 0; \\ \forall p \in PQ; \end{cases} \quad (1)$$

2) PU-узлы (опорные)

$$\begin{cases} P_p - \bar{P}_p = 0; \\ U_p - \bar{U}_p = 0; \\ \forall p \in PU; \end{cases} \quad (2)$$

3) Qδ-узлы

$$\begin{cases} Q_p - \bar{Q}_p = 0; \\ \delta_p - \bar{\delta}_p = 0; \\ \forall p \in Q\delta; \end{cases} \quad (3)$$

4) балансирующие узлы

$$\begin{cases} U_p - \bar{U}_p = 0; \\ \delta_p - \bar{\delta}_p = 0; \\ \forall p \in BU, \end{cases} \quad (4)$$

где $\bar{P}_p, \bar{Q}_p, \bar{U}_p, \bar{\delta}_p$ — заданные значения параметров режима.

Кроме этого должны быть заданы коэффициенты трансформации всех трансформаторов, входящих в расчётную схему.

Учет ограничений. Найденные в результате решения УУР зависимые параметры режима могут не удовлетворять условиям допустимости режима. Поэтому при расчёте установившегося режима предусмотрен учёт ограничений в форме неравенств, наложенных на реактивные мощности генераций в PU-узлах, и на активные мощности генераций в Qδ-узлах. Эти ограничения имеют вид:

$$Q_{p \min} \leq Q_p \leq Q_{p \max}; \quad \forall p \in \text{PU}; \quad (5)$$

$$P_{p \min} \leq P_p \leq P_{p \max}; \quad \forall p \in \text{Q}\delta. \quad (6)$$

В случае нарушения ограничений, например по реактивной мощности, реактивная мощность закрепляется на нарушенном пределе, а узел передаётся в подмножество PQ.

Часто при решении УУР бывает необходимо учитывать ограничения в форме неравенств, накладываемые на модули напряжений в узлах электрической сети вида

$$U_{p \min} \leq U_p \leq U_{p \max}. \quad (7)$$

Строго говоря, для устранения нарушений этих ограничений должно предусматриваться изменение коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов в соответствующих ветвях схемы. Однако поскольку устранение таких ограничений строгими методами обеспечивается при решении задачи *оптимизации режима*, то на данном этапе работы использованы более упрощенные подходы. Одним из них является способ, основанный на закреплении напряжения на нарушенном пределе, и передачи узла в подмножество PU. Если при этом в узле нарушаются ограничения вида (5), то реактивная мощность узла закрепляется на нарушенном пределе и узел возвращается в прежнее подмножество с пометкой о нарушении ограничений типа (7).

Для решения нелинейной системы уравнений установившегося режима применена авторская модификация метода Ньютона по параметру, который позволяет получать решения практически при всех возможных заданных условиях, в том числе при их несовместности, с учётом ограничений, накладываемых на изменение ряда режимных параметров.