

АЛГОРИТМ УЧЕТА ЧАСТИЧНЫХ ОТКАЗОВ В РАСЧЕТАХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

А.С. Демин¹, О.М. Котов¹, Е.М. Шишков²

¹Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

²Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Представлены основные положения и первые результаты разработки алгоритма учета частичных отказов в расчетах структурной надежности электрических сетей. Наложение расчета установившегося режима на расчет показателей структурной надежности позволяет произвести более точную оценку структурных свойств рассматриваемой электрической сети, что, в свою очередь, позволит точнее определить ущерб от недоотпуска электроэнергии. Для того чтобы предложенный алгоритм был пригоден для задач большой размерности, необходимо быстро получать оценку потокораспределения в сети. В этой ситуации на первое место выходят оценочные методы и модели, позволяющие получить решение с некоторой погрешностью, но за достаточно малое расчетное время и с малыми затратами на предварительную обработку исходной информации.

Ключевые слова: *структурная надежность, потокораспределение, минимальное сечение, частичный отказ.*

Решение большинства задач проектирования и эксплуатации электрических систем зависит от оценки надежности на различных уровнях иерархии и с разной степенью детализации. При этом инженерный инструментарий, в полной мере отвечающий запросам и требованиям практики, находится на стадии разработки и апробации.

В предлагаемом алгоритме наряду с полными отказами электрооборудования (неработоспособное состояние всех связей с источниками питания) появляется возможность оперативно оценивать частичные отказы (режимные ограничения по связям, обеспечивающим транзит электрической мощности).

Достаточно быстродействующая методика расчета показателей структурной надежности электрических систем, реализованная в программе «Струна», предусматривает три основных расчетных этапа [1]:

- прямой ход: свертка схемы с целью исключения узлов, имеющих одну или две связи со смежными узлами;
- расчет показателей надежности в несворачиваемом эквиваленте путем идентификации одно-, двух- и трехэлементных минимальных сечений;
- обратный ход: развертка схемы до первоначального состояния путем восстановления ранее исключенных узлов с расчетом искомых показателей надежности.

При этом основная задача – синхронизировать оценку потокораспределения с процедурой поиска минимальных сечений в несворачиваемом эквиваленте расчет-

*Андрей Сергеевич Демин, аспирант, каф. автоматизированных электрических систем.
Олег Михайлович Котов, (к.т.н., доц.), доцент, каф. автоматизированных электрических систем.*

Евгений Михайлович Шишков, аспирант, каф. электрических станций.

ной схемы.

Поскольку оценку потокораспределения необходимо выполнять многократно, были использованы оценочные методы и модели, которые позволяют получить решение с некоторой погрешностью, но за достаточно малое расчетное время.

Первый раз и однократно расчет установившегося режима выполняется для исходной расчетной схемы при помощи разделенного метода Ньютона с постоянными матрицами. Полученные результаты используются в процедуре свертки схемы.

Многократная оценка потокораспределения выполняется в цикле по минимальным сечениям сложнозамкнутого эквивалента (рис. 1).

После идентификации минимального сечения оценивается режим электрической сети и контролируется переток мощности либо тока по элементам сечения. Это может быть ток термической стойкости либо иное режимное ограничение. В случае превышения перетока по сечению рассчитывается годовой недоотпуск мощности (электроэнергии) по каждому узлу, отделенному от источников данным сечением. Для этого превышение перетока распределяется между нагрузочными узлами. В настоящей версии распределение выполняется пропорционально мощности узла, однако может быть задан иной порядок, например, с учетом категоричности потребителей. Полученная величина ограничения мощности накапливается в рассматриваемом узле с весом, равным вероятности работоспособного состояния данного сечения.

Затем для обрабатываемого минимального сечения осуществляется цикл по отключению составляющих его элементов. На каждом шаге цикла выполняется оценка потокораспределения с помощью модификации метода обратной матрицы, который не требует обращения матрицы проводимостей. По результатам оценки аналогичным образом контролируется превышение потока по неотключенным элементам сечения. В случае обнаружения превышения для всех узлов, отделенных данным сечением, к ранее сохраненной величине ожидаемого недоотпуска добавляется вновь вычисленная величина ограничения нагрузки с весом, равным вероятности состояния отказа отключенного элемента сечения.

После перебора всех сочетаний отключений элементов в данном сечении выполняется аналогичная обработка следующего.

В общем случае ожидаемый недоотпуск мощности узла находится в соответствии с выражением

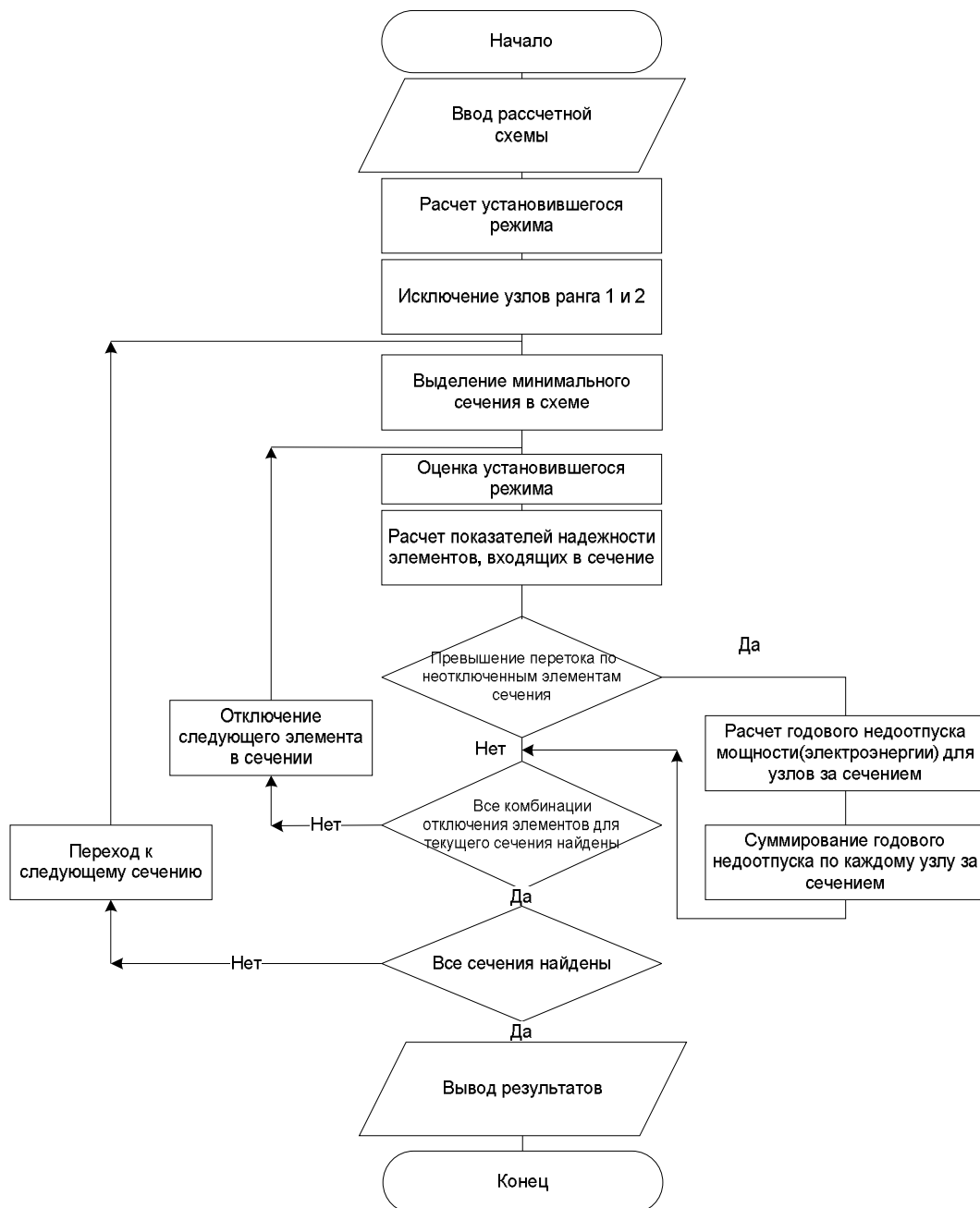
$$W_i = \Delta S_c \cdot q_c \cdot k_i,$$

где ΔS_c – превышение перетока по сечению либо по элементам сечения; q_c – вероятность события, приводящего к превышению перетока; $k_i = S_i / S_\Sigma$ – доля узла i в распределении недоотпущенной мощности; S_i – суммарная мощность нагрузки; S_Σ – мощность узла i .

Поскольку при обработке несворачиваемого эквивалента расчет режима необходимо выполнять многократно, необходимо найти метод, позволяющий получить решение хотя и с некоторой погрешностью, но за минимально возможное время счета. Это особенно актуально для анализа структурной надежности реальных электрических сетей большой размерности, в которых число узлов и линий исчисляется сотнями.

Традиционные методы решения СЛУ, когда матрица коэффициентов меняет свою структуру и численные значения ее элементов изменяются, потребовали бы большого времени счета. На кафедре «Автоматизированные электрические системы» УрФУ разработан алгоритм экспресс-оценки потокораспределения при коммутациях в электрической сети [2-4], основанный на методе Вудбери и учитывающий разрежен-

ность матрицы проводимостей. При разработке концепции централизованной противоаварийной автоматики ОЭС Урала алгоритм был взят за основу с соответствующей адаптацией к информационному обеспечению ЦПА [4, 5].

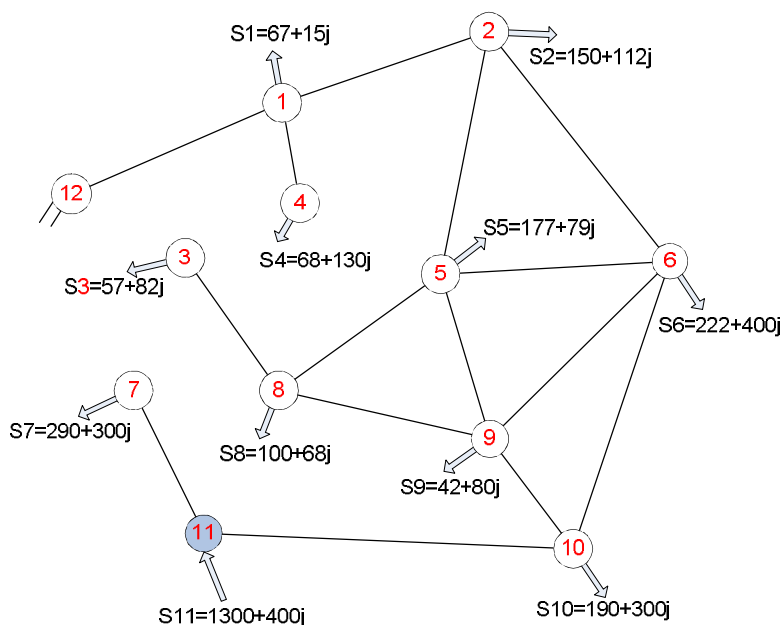


Р и с. 1. Блок-схема алгоритма

Наиболее распространенным является решение нелинейных уравнений установившегося режима методом Ньютона, в котором на каждом итерационном шаге решается система линейных уравнений (СЛУ) с матрицей Якоби. Если для оценочных рас-

четов приемлема какая-либо линейризация, то используется подходящая линейная модель. Таким образом, объем вычислений расчета режима ЭЭС в конечном итоге определяется методом решения СЛУ.

Предложенная методика была апробирована на тестовой схеме (рис. 2).



Р и с. 2. Исходная тестовая схема

В табл. 1 приведены результаты расчетов тестовой схемы с учетом режимных ограничений.

Т а б л и ц а 1

Итоговые данные по недоотпуску мощности

Номер узла	Мощность узла, МВА	Доля узла в распределении недоотпущенной мощности, k	Недоотпущенная мощность узла, МВА	Годовой недоотпуск мощности, МВА	Годовой недоотпуск электроэнергии, МВА·ч
2	341,32	0,21	33,38	0,037204	325,91
5	263,59	0,17	26,43	0,029517	258,57
6	457,48	0,29	45,45	0,050722	444,33
9	174,50	0,11	17,29	0,019285	168,94
10	355,11	0,22	34,85	0,038859	340,41

С помощью программного комплекса «Струна» получены показатели надежности, характеризующие полные отказы узлов тестовой схемы. Табл. 2 содержит результаты расчетов надежности как с учетом режимных ограничений, так и без них.

В заключение можно выделить перспективные направления совершенствования алгоритма:

1. Исключение узлов третьего ранга при свертке схемы. Это способствовало бы уменьшению размера получаемого эквивалента и, как следствие, ускорению получения результатов согласно предложенному алгоритму.

2. Подбор более точной модели для расчета показателей надежности линий электропередач и подстанционного оборудования для получения наиболее объективной оценки электрической системы.

3. Разработка программного модуля, позволяющего ранжировать варианты схем электрической сети в зависимости от ожидаемого годового недоотпуска мощности.

Т а б л и ц а 2

Сводная таблица результатов

Номер узла	Мощность узла, МВА	Вероятность полного отказа узла, $\times 10^{-7}$	Ожидаемый недоотпуск мощности (полный отказ), $\times 10^{-4}$ МВА/год	Ожидаемый недоотпуск мощности (частичные отказы), $\times 10^{-4}$ МВА/год	Суммарный ожидаемый недоотпуск мощности, $\times 10^{-4}$ МВА/год
2	341,32	1,28635	0,439057	372,04	372,4791
5	263,59	1,28638	0,339077	295,17	295,5091
6	457,48	1,28632	0,588466	507,22	507,8085
9	174,50	1,28644	0,224484	192,85	193,0745
10	355,11	1,28629	0,456774	388,59	389,0468

Выводы:

1. Для существенного сокращения времени оценки режима в несворачиваемом эквиваленте расчетной схемы целесообразно использовать алгоритм, основанный на методе Вудбери, который адаптирован для электрических сетей со слабо заполненными матрицами проводимости.

2. Значения ожидаемого недоотпуска, полученные с помощью предложенной методики, существенно превышают аналогичные значения для полных отказов узлов нагрузки электрической сети в связи с тем, что вероятность одновременного отказа элементов, локализирующих наблюдаемый нагрузочный узел, в общем случае на 3-4 порядка меньше, чем вероятность неработоспособного состояния одного элемента.

3. Учет режимных ограничений в расчетах структурной надежности позволяет получить более объективную оценку моделируемой электрической сети.

3. Учет режимных ограничений в расчетах структурной надежности позволяет получить более объективную оценку анализируемой электрической сети.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арзамасцев Д.А., Обоскалов В.П. Расчет показателей структурной надежности энергосистем: Учебное пособие. – Свердловск: Уральский политехнический институт им. С.М. Кирова, 1986. – 80 с.
2. Кирпикова И.Л., Кулешов А.И., Липес А.В., Неуймин В.Г. Алгоритм и программа оперативной оценки возможности отключения элементов основных сетей и межсистемных связей // Советчики диспетчера по оперативной коррекции режимов работы ЭЭС. – Иркутск: АН СССР, СЭИ. – 1984. С. 107-114.
3. Липес А.В., Аюев Б.И. Расчеты послеаварийных режимов в централизованной противоаварийной автоматике ОЭС Урала // Информационное обеспечение. Задачи реального времени в диспетчерском управлении. Ч.2. – Каунас: Изд. ИФТП. – 1989. С.30-35.
4. Аюев Б.И., Бартоломей П.И. Расчеты установившихся режимов в задачах оперативного и автоматического управления ЭЭС: Учебное пособие. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 33 с.
5. Котов О.М., Костарев А.Ф., Тоцаков П.В., Демин А.С. Ранжирование вариантов электрической

Статья поступила в редакцию 3 октября 2011 года

AN ALGORITHM OF ACCOUNTING FOR PARTIAL FAILURES FOR COMPUTING OF STRUCTURAL RELIABILITY OF ELECTRICAL NETWORK

A.S. Demin¹, O.M. Kotov¹, E.M. Shishkov²

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
19, Mira st., Yekaterinburg, 620002

² Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The article presets basics and first results of implementation of the accounting algorithm for partial failures for computing of structural reliability of electrical networks. Application of the steady state mode computing of structural reliability indices computing allows to make more exact estimation of structural properties of the considered electrical network, that allows to define more precisely a damage from an energy undersupply. In the attempt to make offered algorithm suitable for big dimension systems, it is necessary to receive quickly a power flow estimation in a network. In this case estimated methods and the models forge, that allow to receive the decision with some error, but with small estimated time and with small expenses for preliminary processing of the initial data.

Keywords: *structural reliability, power flow, minimal cut, partial failure.*

*Andrey S. Demin, Postgraduate student.
Oleg M. Kotov (Ph.D. (Techn.)), Associate professor.
Evgeniy M. Shishkov, Postgraduate student.*