

# Определение расчетных состояний системы электроснабжения для анализа показателей надежности

ВАНИН А.С.

*Рассмотрены различные аспекты надежности сложной системы электроснабжения, модели ее состояний и способы повышения их расчетной эффективности. Показатели надежности представляют собой комплексную характеристику СЭС и являются следствием влияния многих факторов, которые можно объединить в группы. Структура сети и коммутационные устройства с учетом их параметров определяют структурную надежность системы электроснабжения. Пропускная способность элементов, мощность и диапазоны регулирования источников электроэнергии, компенсирующих и регулирующих устройств определяют функциональную или режимную надежность системы электроснабжения. Настройка релейной защиты, быстроедействие выключателей, динамические характеристики генераторов и электроприемников определяют динамическую составляющую надежности системы электроснабжения. Такое разделение влияющих факторов позволяет свести вычисление показателей надежности системы электроснабжения к трем типам расчетов. Для каждой из составляющих показателей надежности показана необходимость предварительного выделения анализируемых состояний и представлены формальные методы их поиска. Приведенные методы анализа состояний построены на едином вычислительном подходе, который основан на использовании обобщенных параметров сети.*

**Ключевые слова:** электрическая сеть, режим, надежность, обобщенные параметры

Основной функцией систем электроснабжения является надежное обеспечение потребителей электроэнергией требуемого качества. Современная концепция интеллектуальных электрических сетей предполагает не только обеспечение некоторого заданного уровня надежности, но и предоставление услуг по его изменению в соответствии с техническими и экономическими предпочтениями потребителя, что подразумевает наличие в сети инструментов для гибкого управления уровнем надежности [1]. Для этого необходимо обеспечить постоянное наблюдение за состоянием сети с оценкой ее показателей надежности.

Задача оценки надежности системы электроснабжения (СЭС) сводится к определению численных значений показателей ее функционирования. Решением этой задачи, помимо самих показателей надежности (ПН), должны служить вклады различных факторов в итоговое значение, что позволит выработать рекомендации техническому персоналу по обеспечению необходимого уровня надежности.

Показатели надежности представляют собой комплексную характеристику СЭС и являются следствием влияния многих факторов, таких как структура сети; пропускная способность ее элементов; мощность и диапазоны регулирования источников энергии и компенсирующих устройств; наличие, логика и время срабатывания релейной защиты и противоаварийной автоматики; показатели надежности отдельных элементов сети; готовность и доступность к элементам сети оперативного пер-

сонала; характеристик и требований по качеству электроснабжения потребителей электроэнергии, а также ряда других факторов.

Учет различных факторов, определяющих комплексные ПН, требует проведения большого количества разнородных исследований и расчетов.

В литературе надежность электроснабжения иногда анализируется на основе структурных, режимных или динамических моделей сети [2–5]. Целесообразно использовать эти модели совместно, причем каждую из них применять для учета определенных групп влияющих факторов и состояний системы. Выделим соответствующие им составляющие показатели надежности.

*Структурная составляющая* ПН обусловлена структурой сети, т.е. составом элементов, взаимосвязями между элементами и логикой их коммутаций. Расчет этой составляющей ПН заключается в отыскании в СЭС минимальных сечений, отказ элементов которых приведет к прекращению питания рассматриваемой нагрузки. Учитываются как непосредственные отказы элементов сечений, так и их вынужденные простои в результате срабатывания противоаварийной автоматики.

*Функциональная составляющая* обусловлена особенностями режимных реализаций в ЭЭС и отражает возможность нарушения функционирования электроприемников по причине недопустимого снижения качества электроэнергии в послеаварийном режиме. Для ее определения выполняется расчет установившихся режимов в различных послеа-

варийных состояниях сети. Недоотпуск электроэнергии определяется исходя из числа и мощности потребителей, которые необходимо отключить для устранения дефицита активной или реактивной мощности.

*Динамическая составляющая* обусловлена особенностями протекания переходных процессов при различных возмущениях в СЭС. Как правило [6], рассматриваются возмущения в виде коротких замыканий (КЗ). В результате расчета аварийных режимов при КЗ в различных точках системы определяются возмущения, способные привести к потере устойчивости нагрузки за время переходного процесса.

Минимальный недоотпуск электроэнергии в этом случае определяется исходя из времени восстановления технологического процесса.

Возмущение в сети оказывает комплексное влияние на потребителей электроэнергии в рассматриваемом узле нагрузки (УН).

С точки зрения хронологии процесса можно выделить два состояния системы: до локализации отказа (аварийный режим) и после его локализации (послеаварийный режим).

До момента локализации отказа возмущение распространяется по всей электрической системе. Изменение режима в отдельных узлах сети зависит от их удаленности от места приложения возмущения. Сохранение работоспособности электроприемников при этом зависит от остаточного напряжения на их выводах, времени отключения возмущения и значения восстанавливающегося напряжения в соответствии с их динамическими характеристиками. В случае если остаточное напряжение оказывается меньше критического значения и возмущение отключается за время, *большее* критического, происходит нарушение функционирования электроприемника, т.е. его отказ по причине сильного снижения качества электроэнергии (в данном случае – низкое напряжение). Такие отказы формируют динамическую составляющую показателей надежности, и для их анализа необходим расчет переходных процессов.

После локализации возмущения часть элементов сети отключена и выведена из работы; сеть переходит в новый установившийся режим, как правило, с пониженным уровнем функционирования. При этом в послеаварийном режиме СЭС может остаться в работоспособном состоянии или перейти в состояние полного или частичного отказа относительно выбранного УН.

Изменение работоспособности СЭС относительно УН определяется значением потока мощности, проходившего через отключенные в результате

локализации возмущения элементы. Отключение электроприемников в послеаварийном режиме возможно по причине перегрузки элементов электрической сети или при недопустимом снижении напряжения. Такие отказы формируют функциональную составляющую показателей надежности, и для их анализа используются результаты расчетов утяжеленных установившихся режимов.

При полных отказах системы электроснабжения относительно выбранного УН нарушается электрическая связь между источниками электрической энергии и ее потребителями. Для поиска таких состояний достаточно проанализировать структуру электрической сети графоаналитическими методами. Число таких состояний и вероятность их возникновения определяют структурную составляющую показателей надежности системы электроснабжения.

Для состояний частичных отказов выполняются расчеты установившихся режимов, по результатам которых определяются узлы с параметрами режима, выходящими за допустимые границы, при которых возможно нарушение работы электроприемников.

Итоговые ПН СЭС относительно УН определяются по спискам состояний, приводящих к отказу электроприемников с учетом вероятности их появления и длительности прекращения электроснабжения.

Рассматриваются состояния одного и двух одновременных отказов, а также наложения отказа на ремонтное состояние.

Обычно [4] вероятность одновременного отказа трех и более элементов в системе пренебрежительно мала, и такие состояния в расчетах не рассматривают. Таким образом, рассматриваются только состояния с отказом не более двух элементов; общее число таких состояний

$$N = C_n^1 + C_n^2 = 0,5n(n + 1), \quad (1)$$

где  $n$  – число элементов в схеме.

Для схемы, состоящей из 100 элементов, число учитываемых в этом случае состояний равно 5050; для схемы, состоящей из 1000 элементов, таких состояний 500500. Размеры реальных схем гораздо больше и анализ режимов в таком случае невозможен, поскольку число состояний и объем вычислений для каждого из них нелинейно зависят от размеров схемы, что приводит к необходимости декомпозиции рассматриваемой сети.

На основе предварительного анализа сети предлагается выделять для каждой составляющей ПН наиболее значимые состояния и затем проверять их подробными расчетами.

**Составляющие показателей надежности.** Как отмечено ранее, определение ПН целесообразно выполнять по частям, разделив их на составляющие: структурную, функциональную и динамическую. Расчеты этих составляющих различаются по сложности вычислений и по числу учитываемых состояний. Поэтому их расчет предлагается выполнять в строго заданном порядке. Вначале выполняются наиболее общие вычисления структурной составляющей ПН и определяется набор состояний для анализа послеаварийных режимов. Затем для возмущений, после которых СЭС в послеаварийном состоянии остается работоспособной относительно рассматриваемого УН, анализируются аварийные режимы.

**Структурная составляющая ПН.** При расчете структурной составляющей ПН учитывается только топология сети, т.е. схема соединения элементов и изменяющие ее коммутационные воздействия. Отказом СЭС считается полное прекращение питания УН вследствие разрыва связи между нагрузкой и источниками электрической энергии. Результатом расчета является список состояний отказа системы при отказе не более двух элементов или наложении отказа одного элемента на ремонт другого.

Методы поиска сечений графа хорошо известны и подробно описаны в литературе [7]. Применительно к расчетам структурной составляющей ПН алгоритмы поиска сечений в сложной электрической сети описаны в [4]. Суть этих методов заключается в отыскании максимально независимых путей от истока графа к его стоку и нахождении общих для этих путей ветвей, которые и будут образовывать сечение.

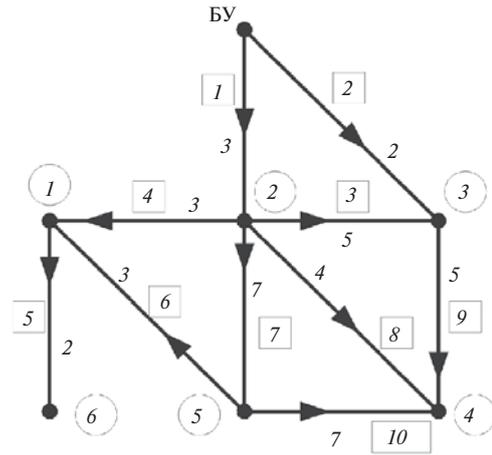
Анализ режимной и динамической надежности удобно выполнять с применением обобщенных параметров схем электрических сетей. Для исключения дополнительных вычислений целесообразно применять их и для анализа структуры сети. Далее представлен разработанный метод поиска минимальных сечений по матрице потокораспределения  $C$ :

$$C = yM_t Z; \tag{2}$$

$$Z = (MyM_t)^{-1}. \tag{3}$$

Здесь  $Z$  – матрица узловых сопротивлений;  $y$  – матрица проводимостей ветвей;  $M$  – первая матрица инцидентности;  $t$  – знак транспонирования матрицы.

**Поиск сечений, состоящих из ветвей.** Поиск сечений по матрице  $C$  выполняется посредством анализа ее столбца, соответствующего рассматриваемому узлу нагрузки  $j$ .



**Рис. 1.** Схема сети для примера расчета структурной и функциональной составляющих ПН:  $\circ$  – номер узла;  $\square$  – номер ветви; 2–5, 7 – сопротивление ветви

тому узлу нагрузки  $j$ . Если элемент матрицы  $C_{ij}$  равен единице, ветвь  $i$  является одноэлементным сечением относительно узла. Если сумма элементов матрицы  $C_{ij}$  и  $C_{kj}$  равна единице и ни ветвь  $i$ , ни ветвь  $k$  не является одноэлементным сечением, то ветви  $i$  и  $k$  составляют двухэлементное сечение относительно узла  $j$ . В некоторых случаях сумма элементов матрицы  $C$ , не являющихся сечением, может быть равна единице. В качестве проверки может быть использовано условие равенства нулю суммарного потока через все элементы сечения от узла, расположенного между сечением и балансирующим узлом.

В качестве иллюстрации данного метода приведена матрица  $C$  для сети, изображенной на рис. 1:

$$C = \begin{pmatrix} 0,606 & -0,628 & -0,248 & -0,489 & -0,548 & -0,606 \\ 0,394 & -0,372 & -0,752 & -0,511 & -0,416 & -0,394 \\ 0,206 & 0,228 & -0,152 & 0,089 & 0,184 & 0,206 \\ 0,680 & 0,022 & -0,015 & -0,088 & -0,381 & -0,680 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0,320 & -0,022 & 0,015 & 0,088 & 0,381 & -0,320 \\ 0,154 & 0,019 & -0,013 & -0,075 & -0,327 & -0,154 \\ 0,022 & 0,104 & -0,069 & -0,416 & -0,060 & 0,022 \\ 0,188 & -0,145 & 0,096 & -0,422 & -0,232 & -0,188 \\ 0,166 & 0,041 & -0,027 & -0,163 & 0,292 & 0,166 \end{pmatrix}$$

Рассмотрим поиск минимальных сечений относительно узла 6, которому соответствует 6-й столбец матрицы  $C$ .

Поскольку элемент матрицы, соответствующий ветви 5, равен единице, эта ветвь представляет собой одноэлементное сечение. Сумма элементов матрицы при попарном сложении равна единице для пар, соответствующих ветвям 1 и 2; 4 и 6. Проверка для сечения (4, 6) может быть выполнена от-

носителем любого узла, кроме 1 и 6. Видно, что  $C_{4j} + C_{6j} = 0$ , где  $j = 2, 3, 4, 5$ .

**Поиск сечений, состоящих из узлов.** Под сечением в электротехнике и энергетике понимается совокупность элементов, исключение которых из схемы нарушает электрическую связь узла нагрузки с узлами источников питания. Элементами сечений могут быть и элементы, представляемые в схеме замещения узлами, например шины. Такие элементы не обладают абсолютной надежностью, а их отказ может сопровождаться отключением большого числа линий, поэтому важно также рассматривать узловы элементы как элементы сечений.

Проблема в определении сечений, состоящих из узлов, по матрице  $C$  заключается в том, что в отличие от ветвей узел может иметь множество входов и выходов.

Если сеть пассивная, то по 1-му закону Кирхгофа сумма потоков в узле равна нулю. Поэтому потоком через узел будем считать суммарный входящий или суммарный выходящий поток. Часть потока, проходящего через один узел сечения, может также проходить и через другой узел, в результате чего суммарный поток через сечение, состоящее из узлов, будет больше единицы.

Удаление узла из схемы равносильно удалению всех инцидентных ему ветвей со входящим или исходящим потоком. Поэтому сечение, состоящее из узлов, можно заменить сечением из ветвей, инцидентных этим узлам. Часть узловых сечений формируется по сечениям, состоящим из ветвей, поскольку если несколько ветвей образуют сечение, то любые комбинации узлов, ограничивающих эти ветви, также образуют сечения. Из оставшихся узлов определяются пары (если речь идет о двухэлементных сечениях), для которых суммарный поток больше единицы. Для них выполняется поиск сечений, состоящих из инцидентных им ветвей.

Для приведенного примера узловы сечения 1; (2, 5); (2, 3) формируются по сечениям, состоящим из ветвей (4, 6) и (1, 2) соответственно. Для определения остальных сечений необходимо проанализировать матрицу распределения потоков по узлам  $S_u$ , в которой строкам соответствуют узлы с заданным единичным током а столбцам – узлы, по которым он распределяется:

$$S_u = \begin{pmatrix} 1 & 0,834 & 0,394 & 0,188 & 0,320 & 0 \\ 0,022 & 1 & 0,372 & 0,145 & 0,041 & 0 \\ 0,015 & 0,248 & 1 & 0,096 & 0,027 & 0 \\ 0,088 & 0,577 & 0,511 & 1 & 0,163 & 0 \\ 0,381 & 0,786 & 0,416 & 0,292 & 1 & 0 \\ 1 & 0,834 & 0,394 & 0,188 & 0,320 & 1 \end{pmatrix}$$

Строка 6-я соответствует потокам через узлы относительно узла 6. Видно, что суммарный поток больше единицы для пар узлов (2, 3); (2, 4); (2, 5). Сечения (2, 5) и (2, 3) уже выбраны. Необходимо выполнить проверку для сечения (2, 4). Для узла 2 ветви со входящими потоками – 4, 7; с исходящими – 1, 3, 8. Для узла 4 ветви со входящими потоками – 8, 10; с исходящими – 9. По матрице  $C$  видно, что комбинация ветвей (1, 3, 9) является сечением, следовательно, узлы (2, 4) также являются сечением.

Отказ элементов, составляющих минимальные сечения, и элементов, приводящих к вынужденному простое элементов минимальных сечений, однозначно приводит к потере питания УН и нарушению технологического процесса, поэтому при рассмотрении других составляющих ПН эти состояния не учитываются.

**Функциональная составляющая ПН.** Отключение одного или нескольких элементов сети ухудшает параметры режима в некоторой локальной области. Напряжения в узлах сети, как правило, уменьшаются, а нагрузки ветвей возрастают. В тяжелых послеаварийных режимах, когда напряжение в рассматриваемом узле нагрузки опускается ниже допустимых значений либо недопустимо перегружаются элементы сети, рассматриваемые электроприемники могут быть отключены от сети действием автоматики.

Чтобы учесть случаи отключения нагрузки по причине выхода параметров режима за допустимую область, необходимо рассчитать ее установившиеся режимы в послеаварийных состояниях.

Последовательный расчет режимов при поочередном отключении всех элементов крайне не эффективен и в сложной сети практически не реализуем. Целесообразно сформировать предварительный набор состояний, в которых достаточно велика вероятность выхода параметров режима из допустимой области. Выбор таких состояний предлагается выполнять следующим образом.

Из рассмотрения исключаются состояния, соответствующие отключению минимальных сечений, полученных при анализе структурной составляющей показателей надежности.

Из оставшихся состояний выбираются те, при которых изменение параметров режима превышает максимально допустимое значение.

Наибольшее влияние на режим рассматриваемого УН будут оказывать отключения элементов, по которым протекает наибольшая часть потока мощности к данному узлу. Выбор этих элементов осуществляется по матрице потокораспределений,

той же, что использовалась для поиска сечений при определении структурной составляющей ПН.

Анализ матрицы  $Z$  показал, что отключение ветви в сложной схеме может приводить как к понижению напряжения в узле, так и к его повышению, вследствие чего необходимо выполнять проверку по направлению отклонения напряжения.

Пусть расчет ведется относительно узла нагрузки  $k$  и выполняется проверка состояния с отключенной ветвью  $a = \{m, n\}$ , где  $m, n$  – ее граничные узлы. Пусть также в нормальном режиме ток в ветви  $a$  направлен от узла  $m$  к узлу  $n$ , тогда:

если  $Z_{km} > Z_{kn}$ , то отключение ветви приведет к повышению напряжения в узле  $i$ ;

если  $Z_{km} < Z_{kn}$ , то отключение ветви приведет к снижению напряжения в узле  $k$ .

Таким образом, сочетание направления тока в исходном состоянии сети и значений матрицы узловых сопротивлений, соответствующих узлам, которые ограничивают рассматриваемую ветвь, определяет направление изменения напряжения в узле при отключении ветви.

Выбор состояний осуществляется последовательными расчетами режимов, начиная от состояний, соответствующих отключению элементов с наибольшим значением параметра потокораспределения, и продолжая до тех пор, пока отключение элементов не перестанет оказывать влияние на режим УН. В первую очередь к ним будут относиться отдельные элементы двух- и трехэлементных сечений.

Расчеты режимов в различных состояниях выполняются на основе матрицы  $Z$ , предварительно определенной для расчета матрицы  $S$ , см. (3). При этом используется матрица  $Z$  исходного состояния, а пересчет элементов при отключении одной или нескольких ветвей выполняется по известным формулам, приведенным в [4, 8]:

$$Z = \begin{bmatrix} 3,86 & 1,818 & 0,788 & 1,73 & 2,9 & 3,86 \\ 1,82 & 1,883 & 0,745 & 1,47 & 1,75 & 1,82 \\ 0,79 & 0,745 & 1,504 & 1,02 & 0,83 & 0,79 \\ 1,73 & 1,467 & 1,022 & 3,13 & 1,99 & 1,73 \\ 2,9 & 1,752 & 0,832 & 1,99 & 4,04 & 2,9 \\ 3,86 & 1,818 & 0,788 & 1,73 & 2,0 & 5,86 \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} 0,15 \\ 0,05 \\ 0,02 \\ 0,4 \\ 0,25 \\ 0,05 \end{bmatrix}$$

$$I = [0,54 \ 0,55 - 0,10 \ 0,26 \ 0,05 - 0,07 \ 0,14 \ 0,18 \ 0,25 - 0,04];$$

$$dU = [26,617,7 \ 1,7 \ 18,4 \ 100,0 - 2,2 \ 2,3 - 0,4 \ 4,9 \ 0,8].$$

Рассмотрим применение этого метода для схемы, приведенной на рис. 1. Для исходного состояния приведены матрица узловых сопротивлений  $Z$ , столбец задающих токов  $J$  и строка токов в ветвях  $I$ :

В строке  $dU$  приведены значения снижения напряжения в узле  $b$  по отношению к значениям нормального режима при отключении отдельных ветвей схемы. Наибольшие коэффициенты потокораспределения для узла  $b$  соответствуют ветвям  $1, 2, 4, 6$ . Отключение ветвей  $1, 2, 4$  приводит к значительному снижению напряжения в узле  $b$  (26,6%; 17,7%; 18,4% соответственно). Отключение ветви  $6$  приводит к повышению напряжения в узле  $b$ , поскольку  $Z_{61} > Z_{65}$ , а ток в исходном режиме направлен от узла  $1$  к узлу  $5$ .

Таким образом, анализ значений коэффициентов потокораспределения с учетом проверки по направлению тока в исходном режиме позволяет определить наиболее тяжелые послеаварийные состояния относительно рассматриваемого узла.

**Динамическая составляющая ПН.** При наличии в сети потребителей, чувствительных к кратковременным провалам напряжения, надежность электроснабжения необходимо анализировать с учетом их характеристик и динамики переходного процесса. Особенно это актуально для расчетов ПН промышленных предприятий, содержащих много электродвигательной нагрузки. В этом случае отказ потребителя из-за нарушения электроснабжения может произойти за период с момента возникновения КЗ до момента срабатывания противоаварийной автоматики, даже если в послеаварийном режиме электроснабжение будет восстановлено.

Основная задача этого этапа расчета – определить виды и точки приложения возмущений, которые могут привести к нарушению функционирования потребителей электроэнергии в рассматриваемом УН. При этом после срабатывания противоаварийной автоматики и при локализации места КЗ в УН должен обеспечиваться допустимый режим. Иначе воздействие этого возмущения будет учтено в структурной или функциональной составляющей ПН.

Как и при расчете функциональной составляющей ПН, необходимо предварительно определить список узлов для расчета аварийного режима.

Поскольку необходимо определить возмущения, которые приведут к недопустимому снижению напряжения на время аварийного режима, но которые не окажут значительного влияния на послеаварийный режим, то критерием выбора узлов для приложения возмущения будет «электрическая» удаленность.

Для упрощенного расчета остаточных напряжений необходимо задать все активные элементы ветвями на землю с переходными ЭДС и сопротивлениями, а в качестве базисного выбрать «узел земли». Тогда изменение схемы при КЗ можно грубо представить добавлением ветви с малым сопротивлением между точкой КЗ и землей.

Элементы матрицы  $Z$  после добавления ветви  $a = \{n, k\}$ , где узел  $n$  — балансирующий, определяются по формуле:

$$Z_{ij} = Z_{ij} - \frac{Z_{ik}Z_{jk}}{Z_{kk} + x_k} \quad (4)$$

Сопротивление ветви на землю  $z_k$  при КЗ близко к нулю. Если считать, что ЭДС и сопротивления активных элементов не изменяются при возникновении КЗ (в схеме изначально активные элементы задаются переходными значениями ЭДС и сопротивлений), то новые напряжения в узлах сети:

$$U_i = \sum_j Z_{ij} \frac{E_j}{X_{dj}} - \frac{Z_{ik}Z_{jk}}{Z_{kk} + x_k} \frac{E_j}{X_{dj}} = \sum_j Z_{ij} \frac{E_j}{X_{dj}} - \frac{Z_{ik}}{Z_{kk}} \sum_j Z_{jk} \frac{E_j}{X_{dj}} = U_i - \frac{Z_{ik}}{Z_{kk}} U_k \quad (5)$$

Приближенно можно считать, что в нормальном режиме напряжения в узлах сети близки к единице, тогда новое значение напряжения (в отн. ед.)

$$U_i \approx 1 - \frac{Z_{ik}}{Z_{kk}}$$

Дальнейший расчет выполняется для узлов, КЗ в которых приводит к снижению напряжения в узле нагрузки ниже критического уровня:  $U_i < U_{кр}$ .

Рассмотрим определение КЗ для схемы, приведенной на рис. 2. На основе матрицы  $Z$ :

0,325	0,302	0,287	0,287	0,287	0,287
0,302	1,049	0,997	0,997	0,997	0,997
0,287	0,997	1,76	1,189	1,76	1,189
0,287	0,997	1,189	1,76	1,189	1,76
0,287	0,997	1,76	1,189	3,65	1,189
0,287	0,997	1,189	1,76	1,189	3,65
0,271	0,941	1,392	1,392	1,392	1,392
0,212	0,734	1,087	1,087	1,087	1,087
0,159	0,551	0,815	0,815	0,815	0,815

0,271	0,212	0,159
0,941	0,374	0,551
1,392	1,087	0,815
1,392	1,087	0,815
1,392	1,087	0,815
1,869	1,459	1,094
1,459	2,842	2,132
1,094	2,132	3,054

были получены значения остаточных напряжений (в отн. ед.) для всех узлов схемы при КЗ во всех точках сети.

Столбцам матрицы  $U_Z$  соответствуют точки КЗ, строкам — узлы сети, в которых определяется остаточное напряжение:

0	0,712	0,837	0,837	0,921	0,921
0,071	0	0,434	0,434	0,727	0,727
0,117	0,050	0	0,324	0,518	0,674
0,117	0,050	0,324	0	0,674	0,918
0,117	0,050	0,000	0,324	0	0,674
0,117	0,050	0,324	0,000	0,674	0
0,166	0,103	0,209	0,209	0,619	0,619
0,348	0,300	0,382	0,382	0,702	0,702
0,511	0,475	0,537	0,537	0,777	0,777
1,563	1,788	3,048	3,048	5,612	5,612

0,855	0,925	0,948	6,957
0,497	0,742	0,820	4,449
0,255	0,618	0,733	3,289
0,255	0,618	0,733	3,289
0,255	0,618	0,733	2,771
0,255	0,618	0,733	2,771
0	0,487	0,462	3,053
0,219	0	0,302	3,338
0,415	0,250	0	4,277
3,006	4,874	5,644	0

В последние столбец и строку внесены сумма элементов матрицы по строкам и столбцам.

В матрице  $U_Z$  выделены элементы, остаточное напряжение в которых меньше критического значения ( $U_{кр} = 0,6$ ). Видно, что для узла 5 опасность представляют КЗ в узлах 1—5, 7, для узла 1 — только КЗ в узле 1.

Аналогичным способом определяются зоны распространения возмущения от несимметричных КЗ. Для этого определяются входные сопротивления схемы замещения относительно рассматриваемого УН для обратной и нулевой последовательности, добавляется сопротивление шунта на землю и

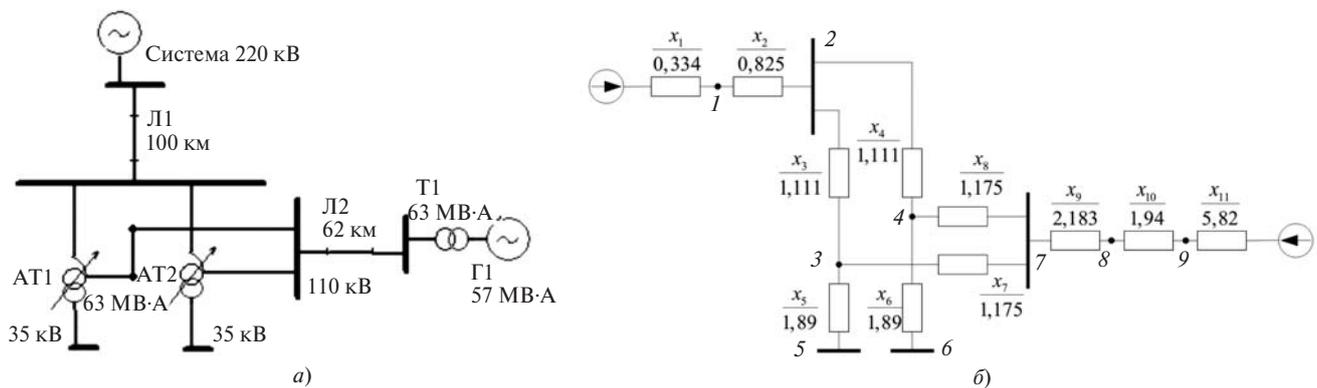


Рис. 2. Схема сети для примера расчета динамической составляющей ПН (а) и ее схема замещения (б)

зависимо рассчитывается матрица остаточных напряжений  $U_Z$ .

В этом случае

$$U_{\phi_i} \gg 1 - \frac{Z_{ik}}{Z_{kk} + DZ^{(n)\phi}},$$

где  $DZ^{(n)}$  – добавочное сопротивление, отражающее изменение входного сопротивления схемы относительно точки приложения несимметричного КЗ по сравнению с трехфазным.

Помимо определения зоны КЗ данная матрица представляет обобщенную характеристику сети. Сумма всех элементов матрицы по столбцам позволяет определить критичность КЗ в данном узле для сети в целом (чем меньше значение, тем мощнее КЗ и сильнее снижение напряжения по всем узлам сети); сумма всех элементов по строкам позволяет определить наиболее чувствительные к КЗ узлы (чем меньше значение, тем большее число КЗ приводит к отказу узла).

Остаточные напряжения, определенные таким способом, характеризуют электрическую удаленность точек КЗ от рассматриваемого узла и позволяют выбрать аварийные состояния для дальнейшего анализа. Вычислительные эксперименты показали, что фактические остаточные напряжения, определенные точными методами расчета, несколько больше приближенных значений. Поэтому выбор расчетных точек КЗ на основе предложенного метода обеспечивает некоторую избыточность.

Для выявленных таким способом состояний затем выполняется расчет переходных процессов с оценкой устойчивости нагрузки в рассматриваемом узле.

По спискам состояний, приводящих к отказам электроприемников при полном или частичном прекращении электроснабжения, а также при потере устойчивости в результате сильного возмущения

в электрической сети определяются показатели надежности системы электроснабжения.

**Выводы.** Надежность системы электроснабжения определяется структурой сети, тяжестью ее послеаварийных режимов и характером переходных процессов. В соответствии с этим целесообразно выделять структурную, функциональную и динамическую составляющие показателей надежности.

Определение функциональной и динамической составляющих показателей надежности требует расчетов соответственно установившихся и переходных режимов. Выполнение таких вычислений для всех возможных состояний системы неоправданно трудоемко. Приведенные методы предварительного анализа сети позволяют выделить расчетные состояния, в которых наиболее вероятен отказ электроприемников по причине нарушения электроснабжения.

Приведенные методы построены на едином вычислительном подходе, который основан на использовании обобщенных параметров сети.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волкова И.О., Бушуев В.В., Веселов Ф.В. и др. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью/Под ред. В.Е. Фортова, А.А. Макарова. – М: ОАО «ФСК ЕЭС», 2012, 300 с.
2. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник. В 4-х т./Под общ. ред. Ю.Н. Руденко. Т.2. Надежность электроэнергетических систем/Под ред. М.Н. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 2000, 568 с.
3. Баринов В.А., Савельев В.А., Сухарев М.Г. и др. Надежность либерализованных систем энергетики. – Новосибирск: Наука, 2004, 333 с.
4. Фокин Ю.А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения. – М.: Энергоатомиздат, 1985, 240 с.
5. Фокин Ю.А., Файницкий О.В., Алиев Р.С. Структурно-функциональная надежность электроэнергетических систем и их объектов. Проблемы комплексной оценки. – Изв. РАН. Энергетика, 1999, № 5.
6. Винославский В.Н., Пивняк Г.Г., Несен Л.И. и др. Переходные процессы в системах электроснабжения: Учебник/Под

ред. Г.Г. Пивняка. — М.: Энергоатомиздат; Днепропетровск: Национальный горный университет, 2003, 548 с.

7. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы: построение и анализ. — М.: МЦНМО, 2000, 893 с.

8. Жуков Л.А., Стратан И.П. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем: Методы расчётов. — М.: Энергия, 1979, 416 с.

[25.10.13]

*Автор: Ванин Артем Сергеевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 2011 г. Аспирант кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ».*

## Determining the Design States for Analyzing the Power Supply System Reliability Indicators

A.S. VANIN

*Various aspects concerned with reliability of a complex power supply system, the models of its states, and methods for improving their calculation efficiency are considered. The reliability indicators represent a comprehensive characteristic of the power supply system and are the consequence from the effect of many factors, such as network structure, transmission capacity of its elements, capacity and adjustment ranges of power sources and compensating elements; the availability, logic, and actuation time of relay protection and emergency control systems; reliability indicators of individual network components, availability of operative personnel and accessibility of network components for maintenance; characteristics of power consumers and the requirements they impose on the power supply quality, and a number of other factors.*

*Key words: electric network, operating mode, reliability, generalized parameters*

*Author: Artem Sergeevich Vanin graduated from the Electric Power Engineering Department of the Moscow Power Engineering Institute (MPEI) in 2011. He is a post-graduate student in the Department of Electric Power System at the National Research University «MPEI».*

\* \* \*

### Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах (на русском и английском языках). В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита; место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять реферат (не менее 100 слов) на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.