

УДК 621.316.06.019.34.001.24

**Ковалев А.П.<sup>1</sup>, Чурсинов В.И.<sup>2</sup>, Якимишина В.В.<sup>3</sup>, Солодухины А.П.<sup>4</sup>**

### **ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С УЧЕТОМ ТРЕХ ВИДОВ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ**

*Рассмотрены критерии оценки надежности системы снабжения электроэнергией. При оценке надежности учитываются три вида отказов элементов схемы: отказ типа короткое замыкание, отказ типа «обрыв цепи» и отказ в срабатывании. Представлены формулы для расчета параметров потока отказов и восстановления для сложных по структуре схем.*

На современном этапе развития техники и технологии для оценки надежности схем систем электроснабжения (СЭС) широкое распространение получили элементные методы расчетов надежности. В этих методах предполагается, что СЭС состоит из отдельных самостоятельных (в смысле анализа надежности) элементов, исключаются из рассмотрения функциональные зависимости между параметрами отдельных элементов устройства [1-4].

Рассматриваемые СЭС состоят из элементов: линии электропередачи, трансформаторы, выключатели, отделители, разъединители, автоматические выключатели и т.д.

Под узлами схемы будем понимать физические пункты СЭС, которые непосредственно связаны не менее чем с тремя направлениями передачи энергии, т.е. обычно это сборные шины или секции распределительных устройств и т. д. [3].

Для СЭС в работе [4] введены понятия: отказ типа «обрыв цепи» и отказ типа «короткое замыкание» («КЗ»). В работе [3] кроме перечисленных видов отказов предлагается учитывать и переход аварии через коммутационный аппарат. Факторы, которые целесообразно было бы учесть при расчетах надежности СЭС, перечислены в [5]. В работе [6] обосновано, что целесообразно делить отказы, которым подвергается электрооборудование в процессе эксплуатации более чем на три вида. Поэтому разработка методики оценки надежности сложных по структуре схем с учетом трех видов отказов является весьма актуальной.

Целью настоящей работы является разработка методики расчета надежности системы электроснабжения промышленных предприятий с учетом трех видов отказов электрооборудования.

#### *Результаты исследований*

В данной работе рассматриваются следующие виды отказов элементов схемы: отказ типа «короткое замыкание», отказ типа «обрыв цепи» и отказ в срабатывании (скрытый отказ).

Все остальные отказы, которые встречались в СЭС промышленных предприятий Украины, появлялись на порядок реже отобранных и поэтому в расчетах не учитывались.

Перечисленные виды отказов следует относить к следующим типам электрооборудования [7].

1. Отказ типа «короткое замыкание». Такой вид отказа может происходить во всех элементах схемы, через которые проходит ток нагрузки в нормальном режиме работы. Короткие замыкания (КЗ) в таких элементах отключаются основной релейной защитой, в зоне действия которой находится рассматриваемый элемент сети, либо резервной с выдержкой времени. Перекрытие изоляции в самом защитном коммутационном аппарате в этих расчетах не учитываем, так как такие повреждения встречаются на порядок реже, чем КЗ в защищаемых этими коммутационными аппаратами элементах сети.

<sup>1</sup> ДонНТУ, д-р техн. наук, проф.

<sup>2</sup> ДонНТУ, канд. техн. наук, доц.

<sup>3</sup> ДонНТУ, аспирант

<sup>4</sup> ДонНТУ, магистрант

2. Для защитных коммутационных аппаратов будем учитывать два вида отказов:

а) отказ выключателя типа «обрыв цепи». К таким отказам будем относить ложные и излишние отключения выключателей в результате действия релейной защиты, которые ликвидируются с помощью ручного переключения (т.е. без средств автоматики), а также автоматические отключения выключателей в результате повреждений во вторичных цепях релейной защиты;

б) отказ выключателя в срабатывании. Эти отказы выявляются в результате профилактических осмотров выключателей: привода, катушки отключения, дугогасительной камеры, контактной системы, оценивается возможность перекрытия изоляции при внешних и внутренних перенапряжениях, проверяются пути утечки тока. Производится осмотр релейных защит, контактов самих реле, проверяются уставки защит, оперативные цепи питания, работа устройства автоматического повторного включения (АПВ), устройства автоматического ввода резерва (АВР) и т.д.

Все выявленные в результате профилактики отказы, которые могли бы привести к отказу в срабатывании выключателя при появлении КЗ в зоне действия его релейной защиты, заносятся в специальный журнал и эта информация используется для определения параметров потока отказов системы отключения выключателя.

В качестве критерия оценки надежности системы электроснабжения будем использовать вероятность бесперебойного электроснабжения  $R(t)$  потребителей, получающих электроэнергию от рассматриваемого узла нагрузки и среднее время восстановления электроснабжения узла нагрузки  $\tau_\gamma$ , где  $\gamma$  - номер узла нагрузки.

Пусть каждый элемент схемы характеризуется событиями:  $\bar{x}_j, \bar{x}_{oi}, \bar{x}_{si}$ . Событие  $\bar{x}_j$  означает, что в  $j$ -том элементе сети произошло повреждение, которое привело к короткому замыканию в цепи (КЗ);  $\bar{x}_{oi}$  - в  $i$ -том элементе произошел отказ типа «обрыв цепи»;  $\bar{x}_{si}$  - в  $i$ -том элементе произошел отказ в срабатывании.

Примем допущения, позволяющие реальный элемент системы электроснабжения представить его схемой замещения:

- элемент сети может находиться только в двух состояниях: 0 - работоспособное; 1 - отказавшее;

- защитные коммутационные аппараты могут отказывать двумя различными способами: отказ типа «обрыв цепи» и отказ в срабатывании;

- случайные интервалы времени между отказами элементов и длительности нахождения их в отказавшем состоянии не противоречат экспоненциальным функциям распределения вероятностей;

- интервалы времени между отказами (поток отказов) электрооборудования (средств защиты) и длительность их восстановлений (поток восстановлений) взаимно независимы;

- устройство автоматического ввода резерва (АВР) и системы релейной защиты могут выйти из строя только тогда, когда они находятся в режиме ожидания. В данном случае мы предполагаем, что надежность АВР и средств защиты являются функциями времени, а не числа произведенных ими переключений или отключений [8, 9, НИ];

- отказы АВР, средств защиты, систем отключения выключателей и самих выключателей обнаруживаются и устраняются только в результате профилактических проверок -  $\Theta_i, i = \overline{1, m}$ ;

- предполагается, что проверки  $\Theta_i$  абсолютно надежные. После каждого отказа электрооборудования или средств защиты его работоспособность полностью восстанавливается;

- восстановление электрооборудования неограниченное и полное, все работоспособное электрооборудование находится в работе, все отказавшее - в процессе восстановления;

Принятые выше допущения позволяют электрооборудование системы электроснабжения представить в виде элемента, который характеризуется параметром потока отказов и восстановлений:  $\lambda_j, \mu_j; \lambda_{oi}, \mu_{oi}; \lambda_{si}, \mu_{si}$ , где  $\lambda_j = 1/\bar{d}_j, \mu_j = 1/d_j; \bar{d}_j$  - средний интервал времени между появлениями КЗ в  $j$ -том элементе;  $d_j$  - среднее время восстановления или замены оборудования после обнаружения повреждения (КЗ);  $\lambda_{oi} = 1/\bar{d}_{oi}, \mu_{oi} = 1/d_{oi}; \bar{d}_{oi}$  - средний интервал времени между отказами в  $i$ -том элементе (отказ типа «обрыв цепи»);  $d_{oi}$  - среднее время обнаружения и восстановления  $i$ -того поврежденного электрооборудования;  $\lambda_{si} = 1/\bar{d}_{si},$

$\mu_{si} = 1/d_{si}$ ;  $\bar{d}_{si}$  - средний интервал времени между отказами в срабатывании  $i$ -того защитного коммутационного аппарата;  $d_{si}$  - средний интервал времени между обнаружением отказавшего элемента, отсоединения его от сети и восстановления электроснабжения отключившихся и оставшихся неповрежденными потребителей электрической энергии.

Для элементов СЭС должны выполняться условия [1,3,4,11]:

$$\lambda_i/\mu_i \leq 0,01; \lambda_{oi}/\mu_{oi} \leq 0,01. \quad (1)$$

Рассмотрим допущения и положения, позволяющие реальную схему СЭС при оценке ее надежности заменить на эквивалентную:

- выделяется вход и выход системы, т.е. точки, относительно которых определяется надежность электроснабжения. Все источники питания соединяются в одну точку, и эта точка принимается за абсолютно надежную;

- учитываются только те повреждения элементов сети (линии электропередачи, сборные шины, трансформаторы и т.д.), которые приводят к КЗ;

- при расчете надежности схем систем электроснабжения учитываются только аварийные длительные отключения элементов сети. Отключения потребителей на время действия АПВ и АВР не учитываются [4];

- целесообразно учитывать только двойные совпадающие в пространстве и времени отказы: КЗ в отходящей от узла нагрузки линии и отказ в срабатывании ближайшего защитного коммутационного аппарата [3,11].

- отказавший в срабатывании защитный коммутационный аппарат отходящей от узла нагрузки линии и поврежденный потребитель надежно с выдержкой времени отключится вводным коммутационным аппаратом;

- при КЗ в магистральной линии ближайший к месту повреждения защитный коммутационный аппарат, через который прошел сквозной аварийный ток, надежно отключает поврежденную линию;

- частоту появления КЗ на шинах в расчетах, как правило, не учитываем, так как КЗ на шинах появляется на порядок реже, чем на питающих либо отходящих от секции шин линиях.

Принятые выше допущения к элементу системы и самой системе позволяют схему замещения для расчета ее надежности заменить эквивалентной, которая совпадает с принципиальной. Элементы схемы замещения входят в нее своими параметрами потока отказов и восстановлений. Ввиду того, что учитываются два несовместных вида отказов выключателей (отказ типа «обрыв цепи» и отказ в срабатывании), которые вызывают различные по длительности перерывы в электроснабжении потребителей электроэнергии, отдельно составляются две схемы замещения: в первой учитываются отказы типа «обрыв цепи»; а во второй отказы в срабатывании выключателей.

Параметр потока отказов и восстановлений схемы определяется следующим образом:

$$\lambda_{cx} = \lambda_o + \lambda_s, \quad (2)$$

$$\mu_{cx} = \frac{\lambda_o + \lambda_s}{\lambda_o/\mu_o + \lambda_s/\mu_s}, \quad (3)$$

где  $\lambda_o$  - эквивалентный параметр потока аварийного отключения узла нагрузки при учете отказов выключателя типа «обрыв цепи», а для остальных элементов учитываются повреждения, приводящие к КЗ;  $\mu_o$  - эквивалентный параметр потока восстановлений электроснабжения узла нагрузки из-за повреждений: выключателей типа «обрыв цепи» для остальных элементов - отказ типа КЗ;  $\lambda_s$  - эквивалентный параметр потока аварийных отключений рассматриваемого узла нагрузки при учете отказов в срабатывании защитных коммутационных аппаратов в случае появления КЗ в зоне действия их релейной защиты;  $\mu_s$  - эквивалентный параметр потока восстановления электроснабжения рассматриваемого узла нагрузки при отказе в срабатывании защитного коммутационного аппарата в случае появления КЗ в зоне действия его релейной защиты.

Вероятность бесперебойного электроснабжения  $R(t)$  узла нагрузки и наработка на отказ  $T$  определяется следующим образом:

$$R(t) = e^{-\lambda_{cx}t}, \quad (4)$$

$$T = 1/\lambda_{cx}, \quad (5)$$

$$\tau_{cx} = 1/\mu_{cx}. \quad (6)$$

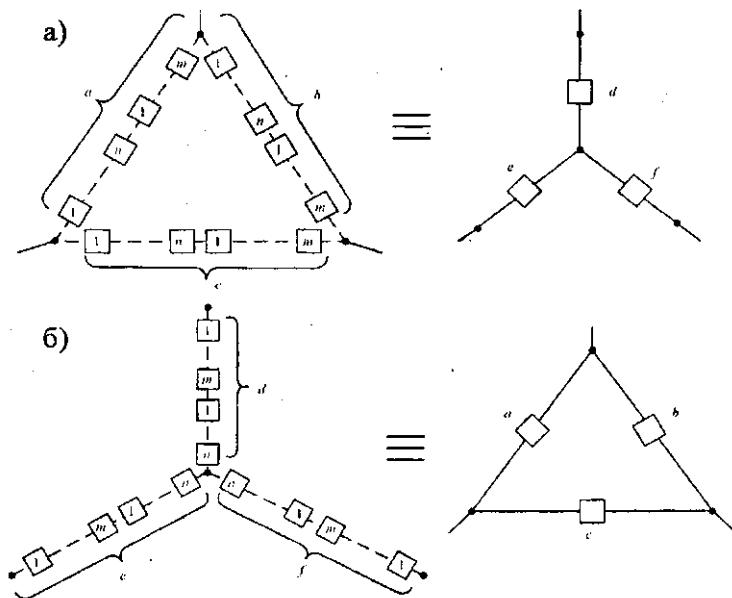


Рис.1 – Варианты преобразования схем

Формулы (12) справедливы при выполнении условий:  $\mu_d + \mu_c > \mu_f$ ,  $\mu_d + \mu_f > \mu_c$ ,  $\mu_c + \mu_f > \mu_d$ .

Используя формулы (7)-(12), учитывая условие (1), схему замещения, определяем:  $\lambda_o$  - параметр потока аварийных отключений узла нагрузки при учете отказа выключателя типа «обрыв цепи» и повреждений остальных элементов типа КЗ;  $\mu_o$  - параметр потока восстановлений электроснабжения узла нагрузки при учете отказов выключателя типа «обрыв цепи» и отказов типа КЗ остальных элементов, входящих в схему.

Для нахождения  $\lambda_s$  и  $\mu_s$  рассматриваются все возможные аварийные ситуации при КЗ в защищаемом элементе сети и отказе в срабатывании ряда защитных коммутационных аппаратов, из-за отказа в срабатывании которых аварийно отключается рассматриваемый узел нагрузки. Строится «дерево» событий, объясняющее процесс аварийного отключения узла нагрузки и затем составляется схема минимальных сечений.

Формула для определения частоты аварийного отключения узла нагрузки при КЗ в защищаемом элементе и отказе в срабатывании ряда защитных коммутационных аппаратов, через которые прошел сквозной аварийный ток, имеет вид [13]:

$$H = \frac{1}{2^m} \sum_{j=1}^n \lambda_j \prod_{i=1}^m \Theta_i^2 \lambda_{s,i}^2, \quad (13)$$

где  $\lambda_{s,i}$  - параметр потока отказов в срабатывании  $i$ -того защитного коммутационного аппарата. Здесь индекс  $s$  указывает на то, что учитывается поток отказов в срабатывании  $i$ -того защитного коммутационного аппарата;  $\Theta_i$  - интервал времени между профилактическими осмотрами системы отключения  $i$ -того защитного коммутационного аппарата вместе с его релейной защитой или системы АВР;  $m$  - число защитных коммутационных аппаратов, через которые прошел сквозной аварийный ток, при этом действие их основной и резервной релейной защиты обязательно или число секционных коммутационных аппаратов с АВР, отказавших во включении;  $n$  - число единиц электрооборудования, получающих электроэнергию от данного узла нагрузки, в которых возможны повреждения типа КЗ;  $k$  - номер минимального сечения.

Формула (13) справедлива при выполнении условия: интервалы времени между появлениями КЗ в элементе сети и интервалы времени между отказами в срабатывании защитных коммутационных аппаратов не противоречат экспоненциальным функциям распределения вероятностей с параметрами соответственно  $\lambda_j$ ,  $\lambda_{s,i}$  и, кроме этого, соблюдается условие

$$\Theta_i \lambda_{s,i} < 0,1. \quad (14)$$

В том случае, если сроки профилактики систем отключения защитных коммутационных

аппаратов будут одинаковы (т.е.  $\Theta_i = \Theta$ ,  $i = \overline{1, m}$ ), тогда формула (13) примет вид:

$$H_k = \frac{1}{2^m} \Theta^{2m} \sum_{j=1}^n \lambda_j \prod_{i=1}^m \lambda_{s,i}^2, \quad (15)$$

Параметр потока отказов  $\lambda_s$  определится следующим образом:

$$\lambda_s = \sum_{k=1}^g H_k, \quad (16)$$

где  $g$  - число минимальных сечений.

Параметр потока восстановлений:

$$\mu_s = 1/\tau_s,$$

где  $\tau_s$  - среднее время обнаружения поврежденного элемента, отключения его от сети и восстановление электроснабжения отключившихся потребителей, получающих электроэнергию от рассматриваемого узла нагрузки.

#### Выводы

1. Предложена методика расчетов надежности структурно-сложных схем систем электроснабжения промышленных предприятий, отличающаяся от известных тем, что кроме отказов элементов типа «обрыв цепи» учитываются отказы типа КЗ и отказы в срабатывании защитных коммутационных аппаратов, что в значительной степени повышает точность расчетов.

2. В том случае, если условия (1) и (14) не выполняются, на кафедре электроснабжения промышленных предприятий и городов получены системы линейных дифференциальных уравнений, которые позволяют с помощью ЭВМ оценить надежность любой сложной по структуре схемы и выбрать оптимальные с точки зрения надежности и приведенных затрат сроки профилактики средств защиты.

#### Перечень ссылок

1. Рябинин Н.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем.-2-е Изд./И.А. Рябинин. - Л.: Судостроение, 1971.- 456 с.
2. Нечишоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надежность) / В.И. Нечишоренко. - М.: Сов. радио, 1977. - 216 с.
3. Фокин Ю.А. Расчет надежности систем электроснабжения / Ю.А. Фокин, А.М. Харченко // Электричество. - 1982.- №8.- С. 5-10.
4. Константинов Б.А. Логико-аналитический метод расчета надежности восстанавливаемых систем электроснабжения / Б.А. Константинов, Э.А. Лосев // Электричество. - 1971. -№ 12. - С. 21-25.
5. Синьчугов Ф.И. Основные положения расчета надежности электроэнергетических систем / Ф.И. Синьчугов // Электричество.- 1980.- №4.- С. 12-16.
6. Лосев Э.А. Отклик на статью Ф.И. Синьчугова/ Э.А. Лосев // Электричество. -1981. -№ 9. - С. 72-73.
7. О расчете надежности систем электроснабжения газовых промыслов / И.В. Белоусенко, М.С. Ершов, А.П. Ковалев, В.В. Якимшина, О.А. Шевченко // Электричество. - 2004. - №3. - С. 23-28.
8. Фабрикант В.И. О применении теории надежности к оценке устройств релейной защиты / В.П. Фабрикант // Электричество. - 1965. - №9. - С. 36-40.
9. Смирнов Э.П. Влияние профилактического контроля на результирующую надежность релейной защиты/ Э.П. Смирнов // Электричество. - 1965. - №4. - С. 11-15.
10. Барзам А.Б. Отклик на статью Э.П. Смирнова / А.Б. Барзам // Электричество. - 1967. - №8. - С. 83-87.
11. Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах / Дж. Эндрени. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 336 с.
12. Ковалев А.П. Метод расчета надежности сложных схем систем электроснабжения с учетом восстановления элементов / А.П. Ковалев, Л.И. Сердюк // Электричество. - 1985. - №10. - С. 52-53.
13. О надежности максимальных токовых защит, применяемых в сетях угольных шахт / А.Л. Ковалев, И.В. Белоусенко, В.П. Муха, А.В. Шевченко // Электричество. -1995. - №2. - С. 17-20.

Статья поступила 17.03.2005