

МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УЗЛОВ НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ ОТКАЗОВ В СРАБАТЫВАНИИ ЗАЩИТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

Ковалев А.П., Муха В.П., Шевченко О.А., Якимущина В.В.

Донецкий национальный технический университет

Olga@elf.dgtu.donetsk.ua

Calculated formulas are suggested which allow to estimate frequency of emergency switching-off loading units taking into account refusal in operation protective switching devices. The example of calculation is given.

Предлагаемый метод расчета надежности восстанавливаемых систем электроснабжения отличается от существующих [1-5] тем, что кроме оценки отказов коммутационных аппаратов типа «обрыв цепи» учитывается еще и второй вид отказа – отказ защитного коммутационного аппарата в срабатывании при появлении коротких замыканий (КЗ) в зоне действия их релейных защит.

В виду того, что отказ защитного коммутационного аппарата типа «обрыв цепи» и отказ в срабатывании события независимые и несовместные, а также по-разному действуют на рассматриваемый узел нагрузки (секция шин либо отдельно взятый потребитель), для оценки надежности электроснабжения узла нагрузки составляются две логические схемы замещения.

В первой схеме замещения учитывается влияние отказов защитных коммутационных аппаратов типа «обрыв цепи». Во второй схеме замещения учитываются такие отказы в срабатывании коммутационных аппаратов, которые влияют на частоту аварийных отключений рассматриваемого узла нагрузки.

Для элементов сети, защищаемых коммутационными аппаратами, учитываются два типа повреждений. Повреждения, приводящие к КЗ или однофазным замыканиям на землю (ОЗ).

Расчет и составление первой схемы замещения, где учитываются отказы коммутационного аппарата только типа «обрыв цепи» не вызывают затруднений [1-5].

Эквивалентный параметр потока отказов λ_k и восстановлений μ_k системы, состоящей из n логически последовательного соединения элементов (рис.1,а) определяются следующим образом (учитывается отказ защитного коммутационного аппарата типа «обрыв цепи», а для защищаемого элемента повреждение типа КЗ),[6]:

$$\lambda_k = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (1)$$

$$\mu_k = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i}, \quad (2)$$

где λ_i - параметр потока отказов i -го элемента;

μ_i - параметр потока восстановлений i -го элемента;

k - номер эквивалентного элемента;

n - общее число логически последовательно соединенных элементов.

Эквивалентный параметр потока отказов λ_v и восстановлений μ_v системы, состоящей из m логически параллельного соединения элементов (рис.1,б) определяются по следующим формулам:

$$\lambda_v = \frac{\prod_{i=1}^m \lambda_i \left(\sum_{i=1}^m \mu_i \right)}{\prod_{i=1}^m \mu_i}, \quad (3)$$

$$\mu_v = \sum_{i=1}^m \mu_i, \quad (4)$$

где v - номер эквивалентного элемента;

m - общее число логически параллельно соединенных элементов.

Для оценки надежности сложных по структуре схем систем электроснабжения используются формулы переходов, [5].

Формулы переходов от соединения в виде логического "треугольника" к эквивалентному по надежности соединению в виде "звезда" (рис.1,в) :

$$\lambda_d = \frac{\lambda_a \cdot \lambda_b \cdot (\mu_a + \mu_b)}{\mu_a \cdot \mu_b} \quad (5)$$

$$\mu_d = \mu_a + \mu_b,$$

$$\lambda_f = \frac{\lambda_b \cdot \lambda_c \cdot (\mu_b + \mu_c)}{\mu_b \cdot \mu_c},$$

$$\mu_f = \mu_b + \mu_c,$$

$$\lambda_e = \frac{\lambda_a \cdot \lambda_c \cdot (\mu_a + \mu_c)}{\mu_a \cdot \mu_c},$$

$$\mu_e = \mu_a + \mu_c,$$

где $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ - параметры потока отказов элементов, логически соединенных в виде "треугольника";

μ_a, μ_b, μ_c - параметры потока восстановлений элементов, логически соединенных в виде "треугольника";

$\lambda_d, \lambda_f, \lambda_e$ - параметры потока отказов элементов, логически соединенных в виде "звезды";

μ_d, μ_f, μ_e - параметры потока восстановлений элементов, логически соединенных в виде "звезды".

Формулы переходов от соединения в виде логической "звезды" к эквивалентному по надежности соединению в виде "треугольника" (рис.1,г),[5]:

$$\lambda_a = 0,5 \sqrt{\frac{\lambda_d \cdot \lambda_e \cdot \mu_f}{\mu_d \cdot \mu_e \cdot \lambda_f}} \cdot (\mu_d + \mu_e - \mu_f), \quad (6)$$

$$\mu_a = 0,5(\mu_d + \mu_e - \mu_f),$$

$$\lambda_b = 0,5 \sqrt{\frac{\lambda_d \cdot \lambda_f \cdot \mu_e}{\mu_d \cdot \mu_f \cdot \lambda_c}} \cdot (\mu_d + \mu_f - \mu_e),$$

$$\mu_b = 0,5(\mu_d + \mu_f - \mu_e),$$

$$\lambda_c = 0,5 \sqrt{\frac{\lambda_e \cdot \lambda_f \cdot \mu_d}{\mu_e \cdot \mu_f \cdot \lambda_d}} \cdot (\mu_e + \mu_f - \mu_d),$$

$$\mu_c = 0,5(\mu_e + \mu_f - \mu_d).$$

Формулы справедливы при выполнении условий:

$$\mu_d + \mu_e > \mu_f,$$

$$\mu_d + \mu_f > \mu_e,$$

$$\mu_e + \mu_f > \mu_d.$$

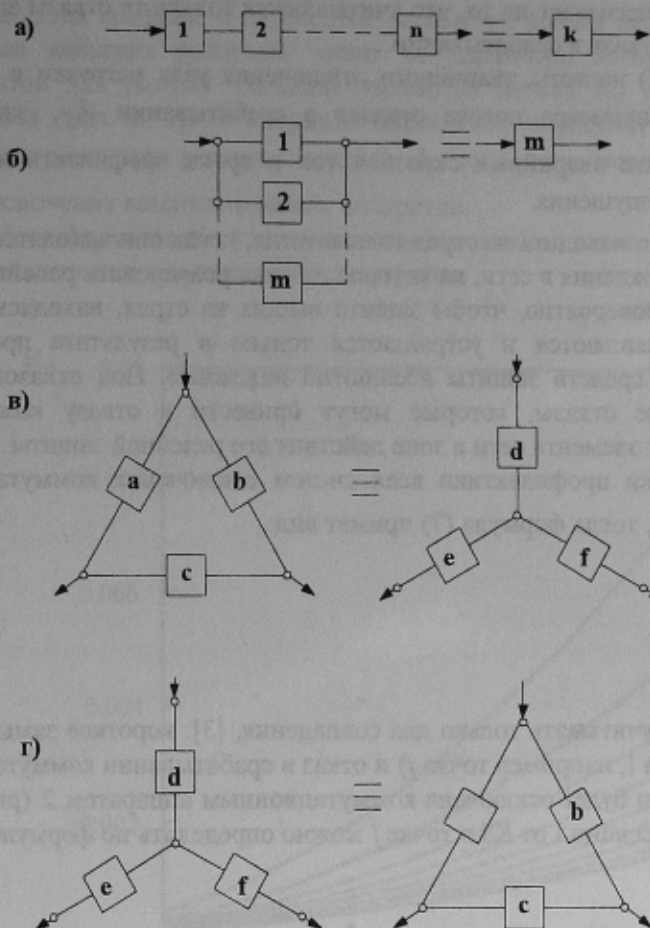


Рисунок 1 – Варианты преобразования схем

Рассмотрим влияние отказов в срабатывании защитных коммутационных аппаратов на надежность узлов нагрузки (рисунок 2, секции шин I и II).

Пусть каждый элемент схемы (рис.2) характеризуется событием: $x_{i,j}$ – i -й элемент работает, в нем не наблюдается отказ j -го вида; $\bar{x}_{i,j}$ – в i -м элементе произошел отказ j -го вида; $y_{i,j}$ – i -й защитный коммутационный аппарат работает и в нем не наблюдается отказ j -го вида; $\bar{y}_{i,j}$ – в i -м защитном коммутационном аппарате произошел отказ j -го вида.

Каждое событие характеризуется параметром потока отказов – $\lambda_{i,j}$ и параметром потока восстановлений – $\mu_{i,j}$, где код i обозначает номер элемента в схеме, а код j обозначает вид отказов элемента ($j=1$ – короткое замыкание; $j=2$ – замыкание на землю; $j=3$ – обрыв цепи; $j=4$ – отказ в срабатывании коммутационного аппарата). Для каждого элемента, входящего в схему, должно выполняться условие $\lambda_{i,j} \leq 100\mu_{i,j}$; $\Theta_i \lambda_{S,i} < 0,1$, где Θ_i – интервал времени между профилактическими осмотрами i -той системы отключения коммутационного аппарата, в том числе и его релейной защиты.

Если известны параметр потока КЗ в зоне действия МТЗ защитного коммутационного аппарата – λ_j ; Θ_i – интервал времени между профилактическими осмотрами i -той системы отключения коммутационного аппарата, в том числе и его релейной защиты; $\lambda_{S,i}$ – параметр потока отказов системы отключения i -го коммутационного аппарата (эти отказы выявляются только в результате профилактических осмотров систем отключения выключателей и средств защиты); m – число коммутационных аппаратов, через которые прошел сквозной аварийный ток и привел в действие их релейные защиты, тогда параметр потока перерывов в электроснабжении узла нагрузки (системы шин I, рисунок 2) при КЗ в зоне действия релейных защит m -х защитных коммутационных аппаратов определяется по следующей формуле:

$$H_l = \frac{1}{2^m} \lambda_j \prod_{i=1}^m \Theta_i^2 \lambda_{S,i}^2, \quad (7)$$

где s – индекс, который указывает на то, что учитываются только те отказы защитного коммутационного аппарата, которые приводят к отказу в срабатывании.

При выводе формулы (7) частоты аварийного отключения узла нагрузки в зависимости от параметра потока появления КЗ λ_j , параметра потока отказов в срабатывании $\lambda_{S,i}$ защитного коммутационного аппарата, через который прошел аварийный сквозной ток и срока профилактики его системы отключения Θ_i , были приняты следующие допущения.

Устройства защиты могут выходить из строя только тогда, когда они находятся в режиме ожидания. Если к моменту возникновения повреждения в сети, на которое должна реагировать релейная защита, она находилась в исправном состоянии, то маловероятно, чтобы защита вышла из строя, находясь в режиме тревоги [7-10]. Отказы в схемах защиты выявляются и устраняются только в результате профилактических проверок. Предполагается, что проверки средств защиты абсолютно надежны. Под отказом в срабатывании средств защиты будем понимать такие отказы, которые могут привести к отказу коммутационного аппарата в срабатывании при повреждении элемента сети в зоне действия его релейной защиты.

В том случае, если сроки профилактики всех систем отключения коммутационных аппаратов будут одинаковы, т.е. $\Theta_i = \Theta, i = \overline{1, m}$, тогда формула (7) примет вид:

$$H_l = \frac{1}{2^m} \lambda_j \Theta^{2m} \prod_{i=1}^m \lambda_{S,i}^2. \quad (8)$$

На практике достаточно учитывать только два совпадения, [3]: короткое замыкание в линии, отходящей от рассматриваемого узла (шина I, например точка j) и отказ в срабатывании коммутационного аппарата 1.

В этом случае секция шин будет отключена коммутационным аппаратом 2 (рис.2, $m=1$). Тогда параметр потока аварийного отключения секции I от КЗ в точке j можно определить по формуле:

$$H_l = \frac{1}{2} \lambda_j \Theta^2 \lambda_{S,i}^2, \quad (9)$$

где l – номер минимального сечения.

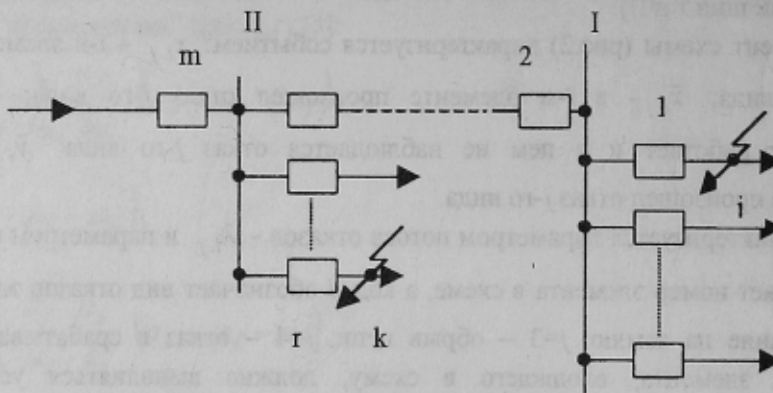


Рисунок 2 - Принципиальная схема электроснабжения узла нагрузки

С помощью формулы (9) можно определить частоту аварийного отключения секции I и II (рисунок 2). Например, при КЗ в точке "К" и отказе в срабатывании коммутационного аппарата "r" секции шин I и II отключаются коммутационным аппаратом "m".

Если нас интересует зависимость параметра потока аварийных отключений узла нагрузки (секция шин I, рисунок 2) от частоты появления КЗ в отходящих от секции I и II линий, надежности систем отключения защитных коммутационных аппаратов, сроков их профилактических осмотров, тогда

$$\lambda_S = \sum_{l=1}^N H_l, \quad (10)$$

где H_l - параметр потока отказов в срабатывании l -го коммутационного аппарата при появлении КЗ в зоне действия его релейной защиты;

N - число коммутационных аппаратов, отказ в срабатывании которых (КЗ в зоне действия их релейных защит) приводит к отключению узла нагрузки (секция шин I).

На рисунке 3 приведены графики зависимостей параметра потока перерывов в электроснабжении узла нагрузки при КЗ в зоне действия релейных защит от параметра потока отказов системы отключения коммутационных аппаратов для разных значений параметра потока КЗ в зоне действия МТЗ защитного коммутационного аппарата (для $m=1$). Эти кривые позволяют определить параметр потока перерывов в электроснабжении узла нагрузки для разных значений λ_j и $\lambda_{S,i}$, а также для различных значений срока профилактики систем отключения коммутационных аппаратов.

Приведенные в работе формулы позволяют оценить надежность электроснабжения любого узла нагрузки при учете отказов в срабатывании коммутационных аппаратов.

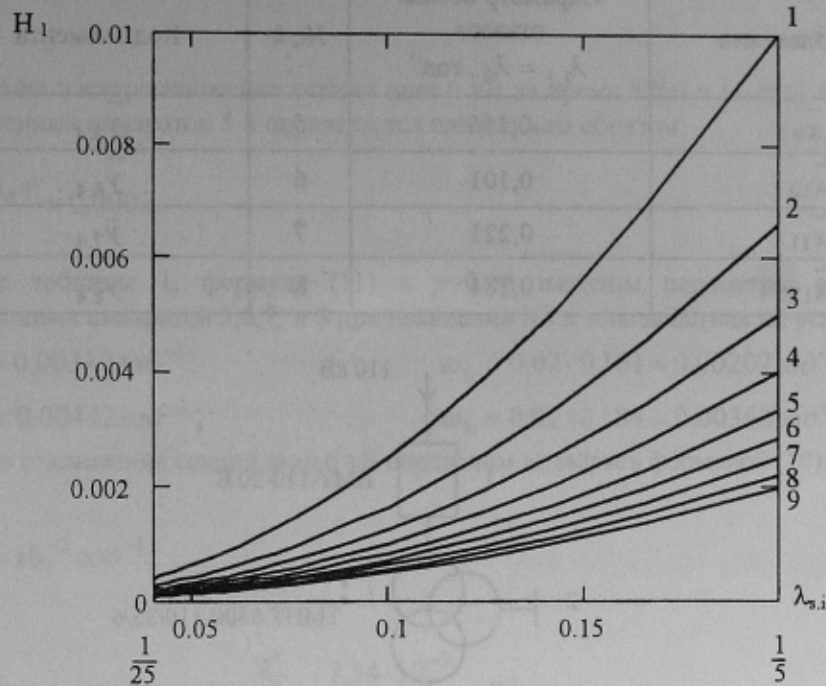


Рисунок 3 – Зависимость параметра потока перерывов в электроснабжении узла нагрузки от параметра потока отказов в срабатывании коммутационных аппаратов для различных параметров потока КЗ в зоне действия релейной защиты коммутационного аппарата:

- | | |
|---|---|
| Кривая 1 - $\lambda_j = 1/2 = 0,5 \text{ год}^{-1}$ | Кривая 6 - $\lambda_j = 1/7 = 0,143 \text{ год}^{-1}$ |
| Кривая 2 - $\lambda_j = 1/3 = 0,33 \text{ год}^{-1}$ | Кривая 7 - $\lambda_j = 1/8 = 0,125 \text{ год}^{-1}$ |
| Кривая 3 - $\lambda_j = 1/4 = 0,25 \text{ год}^{-1}$ | Кривая 8 - $\lambda_j = 1/9 = 0,111 \text{ год}^{-1}$ |
| Кривая 4 - $\lambda_j = 1/5 = 0,2 \text{ год}^{-1}$ | Кривая 9 - $\lambda_j = 1/10 = 0,1 \text{ год}^{-1}$ |
| Кривая 5 - $\lambda_j = 1/6 = 0,167 \text{ год}^{-1}$ | |

В работе [3] параметр потока отказов в срабатывании коммутационного аппарата определяется следующим образом:

$$\omega = p \cdot \lambda_j, \quad (11)$$

где p - вероятность того, что выключатель не сработает при появлении КЗ в зоне действия релейной защиты;

λ_j - поток КЗ в зоне действия релейной защиты рассматриваемого коммутационного аппарата.

Для коммутационных аппаратов $U=6-10 \text{ кВ}$ - $p=0,02$, [4], а для $U=115-230 \text{ кВ}$ - $p=0,0015$, [3].

Пример: Определим $Q(t)$ вероятность перерыва в электроснабжении секции шин I в течение года $t = 8760 \text{ ч}$. при учете отказа в срабатывании коммутационных аппаратов 5,6,7,8. Дана распределительная схема системы электроснабжения 6 кВ (рисунок 4). Параметры надежности элементов системы приведены в таблице 1. Проверки системы отключения коммутационных аппаратов вместе с релейной защитой (для выявления скрытых отказов, которые могут привести к отказу в срабатывании коммутационного аппарата) проводятся через $\Theta = 4380 \text{ ч}$.

Составим схему замещения, в которой учитываются отказы в срабатывании выключателей отходящих присоединений (рисунок 5).

Поток аварийных отключений секции шин I в результате КЗ в отходящих линиях и отказа в срабатывании соответствующих защитных коммутационных аппаратов определяется по формуле (9) с использованием данных таблицы 1.

Находим параметр потока отказов для первого минимального сечения (рисунок 5):

$$H_1 = 0,5 \cdot \Theta^2 \lambda_5^2 \lambda_1 = 0,5 \cdot 0,5^2 \cdot 0,061^2 \cdot 0,156 = 0,72 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1} .$$

Расчет остальных минимальных сечений заносим в таблицу 2.

Таблица 1- Параметры надежности элементов схемы

№, k	Код элемента	Параметр потока отказов $\lambda_{i,j} = \lambda_k, \text{год}^{-1}$	№, k	Код элемента	Параметр потока отказов $\lambda_{i,j} = \lambda_k, \text{год}^{-1}$
1	$\bar{x}_{9.1}$	0,156	5	$\bar{y}_{5.4}$	0,061
2	$\bar{x}_{10.1}$	0,101	6	$\bar{y}_{6.4}$	0,061
3	$\bar{x}_{11.1}$	0,221	7	$\bar{y}_{7.4}$	0,061
4	$\bar{x}_{12.1}$	0,184	8	$\bar{y}_{8.4}$	0,061

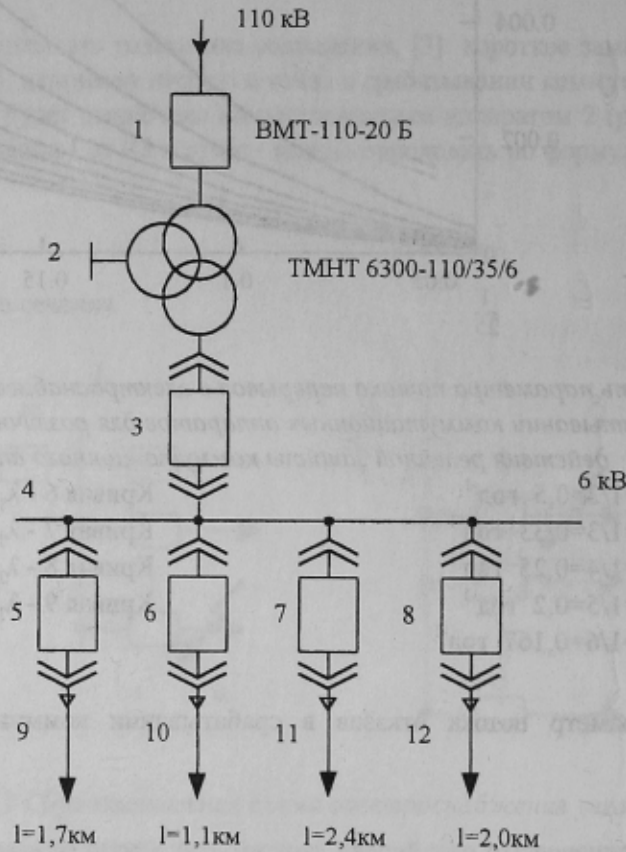


Рисунок 4 - Принципиальная схема электроснабжения

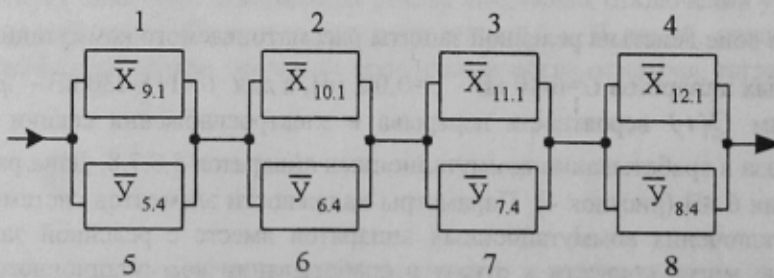


Рисунок 5- Схема минимальных сечений при учете отказов в срабатывании коммутационных аппаратов

Таблица 2- Расчет значений $H_1 + H_4$

l	$H_l, \text{год}^{-1}$	l	$H_l, \text{год}^{-1}$
1	$0,72 \cdot 10^{-4}$	3	$1,02 \cdot 10^{-4}$
2	$0,47 \cdot 10^{-4}$	4	$0,86 \cdot 10^{-4}$

Используя формулу (10) определим частоту аварийного отключения узла нагрузки (секция 6 кВ, рис. 4):

$$\lambda_S = \sum_{l=5}^8 H_l = 3,07 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

Вероятность перерыва электроснабжения секции шин 6 кВ за время 8760 ч (1 год) при учете отказов в срабатывании коммутационных аппаратов 5-8 определяется следующим образом:

$$Q(8760) = 1 - e^{-\lambda_S \cdot 1} = 0,0003.$$

Используя данные таблицы 1, формулу (11) и $p=0,02$ находим параметры потоков отказов в срабатывании коммутационных аппаратов 5,6,7, и 8 при появлении КЗ в зоне действия их релейных защит:

$$\omega_5 = 0,02 \cdot 0,156 = 0,00312 \text{ год}^{-1}; \quad \omega_6 = 0,02 \cdot 0,101 = 0,00202 \text{ год}^{-1}$$

$$\omega_7 = 0,02 \cdot 0,221 = 0,00442 \text{ год}^{-1}; \quad \omega_8 = 0,02 \cdot 0,184 = 0,00368 \text{ год}^{-1}$$

Частоту аварийного отключения секции шин 6 кВ определим пользуясь формулой (10):

$$\lambda_S^* = \sum_{i=5}^8 \omega_i = 7,54 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}.$$

Разница в результатах составляет: $k = \frac{\lambda_S^*}{\lambda_S} = \frac{7,54 \cdot 10^{-3}}{3,07 \cdot 10^{-4}} = 24$ раза.

Вывод

Предложен новый метод расчетов надежности питания узлов нагрузки, который отличается от известных тем, что учитывает надежность системы отключения коммутационных аппаратов, срок их профилактики и частоту КЗ в зоне действия их релейных защит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рябинин И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. -2-е изд. - Л.: Судостроение, 1971. - 456 с.
2. Константинов Б.А., Лосев Э.А. Логико-аналитический метод расчета надежности восстанавливаемых систем электроснабжения // Электричество. - 1971. - №2. - С. 21-25.
3. Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах: Пер.с англ. / Под ред. Ю.Н. Руденко. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 336 с.
4. Надежность систем электроснабжения / Зорин В.В., Тисленко В.В., Клеппель Ф, Адлер Г. - Киев: Высшая школа, 1984. - 372 с.
5. Ковалев А.П., Сердюк Л.И. Метод расчета надежности сложных схем систем электроснабжения с учетом восстановления элементов // Электричество. - 1985. - №10. - С. 52-53.
6. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. - М.: Советское радио, 1975. - 472 с.
7. Фабрикант В.П. О применении теории надежности к оценке устройств релейной защиты // Электричество. - 1965. - №4. - С. 24-27.
8. Смирнов Э.П. Влияние профилактического контроля на результирующую надежность релейной защиты // Электричество. - 1965. - №4. - С. 31-34.
9. Барзам А.Б. Отклик на статью Э.П. Смирнова // Электричество. - 1967. - №8. - С. 21-23.
10. Ковалев А.П., Белоусенко И.В., Муха В.П., Шевченко А.В. О надежности максимальных токовых защит, применяемых в сетях угольных шахт // Электричество. - 1995. - №2. - С. 17-20.