

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УЗЛОВ НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ ТРЕХ ВИДОВ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ

Ковалев А.П., Муха В.П., Васин А.А., Якимишина В.В.

Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: "Електротехніка і енергетика", випуск 50: Донецьк: ДонНТУ, 2002.-с. 125-133.

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.

Для оценки надежности схем систем электроснабжения (СЭС) широкое распространение получили элементные методы расчетов надежности. В этих методах предполагается, что СЭС состоит из 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 нецелесообразно делить отказы, которым подвергается электрооборудование в процессе эксплуатации более, чем на три вида.

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 газовых промыслов, появлялись на порядок реже отобранных и поэтому в расчетах не учитывались.

Перечисленные виды отказов следует относить к следующим типам электрооборудования:

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.

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, 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 потока отказов системы отключения выключателя.

В качестве критерия отказа СЭС чаще всего используется критерий, который требует обеспечить непрерывность электроснабжения в ее основных узлах нагрузки, т.е. определить вероятность бесперебойного электроснабжения $R(t)$ потребителей, получающих электроэнергию в течение времени t от рассматриваемой секции шин и среднее время $\bar{T}_{ср}$ восстановления электроснабжения узла нагрузки [7].

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;

- каждый элемент СЭС характеризуется событиями: $x_{i,j}$ – 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; $\lambda_{сч,i}$ – i -й коммутационный аппарат работает и в нем не наблюдается отказ j -го вида; $\bar{\lambda}_{i,j}$ – в i -м 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; $j=2$ – обрыв цепи; $j=3$ – отказ в срабатывании).

- устройство автоматического ввода резерва (АВР) и системы релейной защиты могут выходить 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 [8-10];

- отказы АВР, средств защиты, систем отключения выключателей и самих выключателей обнаруживаются и устраняются только в результате профилактических проверок - $\Theta_i, i = \overline{1, m}, \Theta_i \cdot \lambda_{i3} < 0,1$;

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

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

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

- для элементов СЭС должно выполняться условие [1-4,7]:

$$\frac{\lambda_{i,j}}{\mu_{i,j}} \leq 0,01$$

- принятые допущения позволяют любое электрооборудование распределительной сети представить в виде элемента, характеризующегося двумя величинами: параметром потока отказов $\lambda_{i,j}$ и параметром потока восстановлений $\mu_{i,j}$.

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 [1,3,12];

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

- при расчете надежности схем систем электроснабжения учитываются только длительные аварийные отключения элементов сети. Отключения потребителей на время действия АПВ и АВР не учитываются [7];

- учитываются только двойные совпадающие в пространстве и времени отказы: короткое замыкание в защищаемой сети и отказ в срабатывании защитного коммутационного аппарата [3,7].

Принятые для расчета надежности СЭС допущения позволяют заменить ее на эквивалентную, совпадающую по структуре с принципиальной. Элементы схемы замещения входят в нее своими параметрами потока отказов и восстановлений.

В схемах замещения СЭС следует учитывать два несовместных вида отказов выключателей (отказ типа “обрыв цепи” и отказ в срабатывании), которые действуют на обеспечение надежности ее узлов различным образом. Отдельно составляются две схемы замещения СЭС, в одной учитываются отказы выключателей типа “обрыв цепи”, в другой – отказы выключателей в срабатывании.

В первой схеме замещения учитываются отказы выключателей только типа “обрыв цепи”, а в остальных элементах СЭС учитываются отказы типа “КЗ”. В этом случае схема замещения по структуре совпадает с принципиальной, без учета потребителей, получающих электроэнергию от соответствующих узлов нагрузки.

В схеме замещения СЭС каждый ее элемент характеризуется: $\lambda_{i,j}$ - поток отказа j -го типа в i -том элементе схемы замещения; $\mu_{i,j}$ - поток восстановления i -го

элемента от j -го вида отказов; $\mu_{i,j} = \frac{1}{\tau_{i,j}}$, где $\tau_{i,j}$ - среднее время восстановления электроснабжения узла нагрузки в результате аварийного ремонта (замены) i -того электрооборудования после возникновения в нем отказа j -того вида ($j = \overline{1,2}$); $\tau_{i,3}$ - среднее время, затрачиваемое обслуживающим персоналом на ручное переключение и восстановление электроснабжения узла нагрузки при отказе в срабатывании ($j=3$) i -го защитного коммутационного аппарата при появлении отказов типа “КЗ” ($j=1$) в защищаемом элементе сети.

Для более компактного написания формул для расчета надежности полученной схемы замещения обозначим: $\lambda_{i,j} = \lambda_k$, $\mu_{i,j} = \mu_k$, $\tau_{i,j} = \tau_r$.

Эквивалентный параметр потока отказов λ_k и восстановлений μ_k системы, состоящей из n логически последовательного соединения элементов определяются следующим образом (учитывается отказ защитного коммутационного аппарата типа “обрыв цепи”, а для защищаемого элемента повреждение типа КЗ), [11]:

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

$$\mu_k = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i}, \quad (3)$$

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_k и восстановлений μ_k системы, состоящей из m логически параллельного соединения элементов определяются по следующим формулам [11]:

$$\overline{y}_{i,j}, \quad (3)$$

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

где m – общее число логически параллельно соединенных элементов.

Для сложных по структуре схем замещения, имеющих в своем составе “мостиковую” структуру [1], для приведения ее к простой – последовательно параллельной - целесообразно использовать преобразование “треугольник-звезда” [13].

Используя формулы (1)-(4), схему замещения, определяем: λ_o - параметр потока аварийных отключений узла нагрузки при учете отказа выключателя типа “обрыв цепи”; μ_o - параметр потока восстановлений электроснабжения узла нагрузки при учете отказов выключателя типа “обрыв цепи” и отказов типа КЗ защищаемого элемента.

Построение второй схемы замещения, которая учитывает отказы в срабатывании коммутационных аппаратов и появление КЗ в зоне действия их релейных защит можно показать на следующем примере, рис. 1,а. Аварийный перерыв в электроснабжении узла нагрузки (секции I) произойдет, например, КЗ в точке “n” и отказе в срабатывании коммутационного аппарата “m”, тогда КЗ в точке “n” будет отключено с выдержкой времени коммутационным аппаратом с номером “m+1”. Электроснабжение секции I восстановится после того, как будет обнаружен поврежденный участок линии и вручную отключен коммутационный аппарат “m”. После этого необходимо включить коммутационный аппарат “m+1” и неповрежденные элементы получают электроэнергию. “Дерево”, объясняющее причину обесточивания секции шин I, и схемы минимальных сечений аварийных событий приведены на рис. 1, б-в.

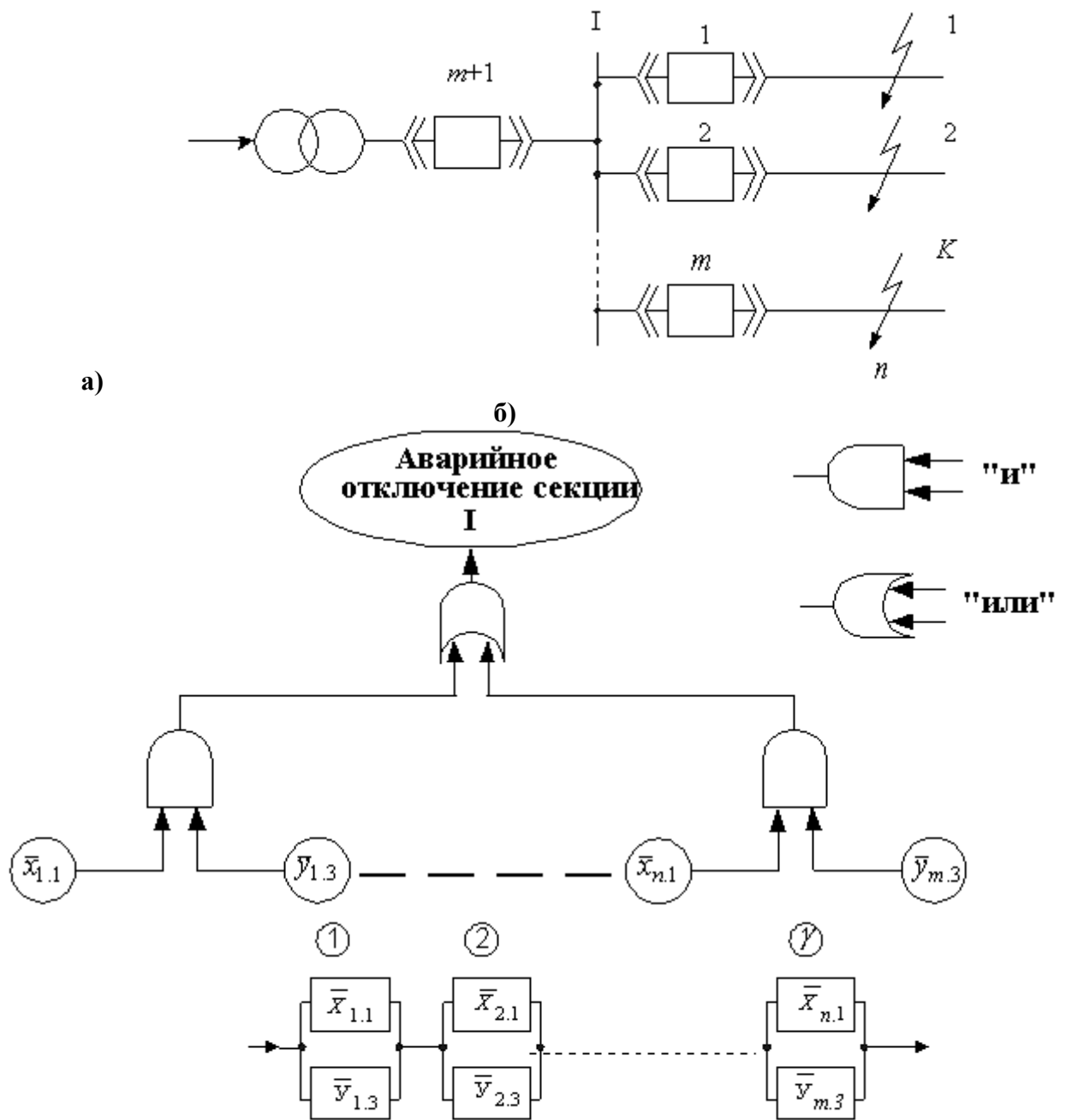
Параметр потока H_1 аварийных отключений узла нагрузки (секция шин I, рис. 1) из-за отказов в срабатывании коммутационных аппаратов для принятых допущений можно определить по аналогичной формуле, полученной в [14]:

$$H_1 = 0,5 \cdot \lambda_{n,1} \cdot \lambda_{m,3}^2 \cdot \Theta_m^2, \quad (5)$$

где $\lambda_{n,1}$ - параметр потока появления КЗ в n-й линии, отходящей от m-го коммутационного аппарата;

$\lambda_{m,3}$ - параметр потока отказов в срабатывании (j=3) m-го коммутационного аппарата;

Θ_m – интервал времени между проверками системы отключения и средств защиты m-го коммутационного аппарата.



в)
Рисунок 1 – Пример схемы:
 а) принципиальная схема электроснабжения секции шин I;
 б) дерево, объясняющее аварийное отключение секции шин I;
 в) схема минимальных сечений аварийных событий.

Параметр потока аварийного отключения λ_s секции шин I от КЗ в отходящих линиях и отказах в срабатывании определяется следующим образом:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^{\gamma} H_i, \quad (6)$$

где $l = \bar{l}, \bar{\gamma}$ - номер минимального сечения;
 γ - число минимальных сечений полученных относительно данного узла схемы.

Параметр потока восстановления электроснабжения μ_s узла нагрузки в результате обнаружения поврежденных элементов, отключения их от сети и восстановления питания узла нагрузки с помощью оперативных переключений можно определить по следующей формуле:

$$\mu_s = \frac{\sum_{i=1}^{\gamma} H_i}{\sum_{i=1}^{\gamma} H_i \cdot \tau_r}, \quad (7)$$

где τ_r - среднее время, затрачиваемое на обнаружение поврежденного элемента сети $r = \overline{1, n}$, отключение его и восстановление электроснабжения узла схемы с помощью оперативных переключений.

Определив параметры λ_o ; μ_o и λ_s ; μ_s для двух схем замещения можно определить параметр потока отказов в электроснабжении узла нагрузки λ_{cx} и среднее время τ_{cx} перерыва его в электроснабжении.

$$\lambda_{cx} = \lambda_o + \lambda_s, \quad (8)$$

$$\tau_{cx} = \frac{\lambda_o \cdot \mu_s + \lambda_s \cdot \mu_o}{\mu_o \cdot \mu_s (\lambda_o + \lambda_s)}. \quad (9)$$

Вероятность бесперебойного электроснабжения узла схемы:

$$R(t) = e^{-\lambda_{cx} t} \approx 1 - \lambda_{cx} \cdot t, \text{ если } \lambda_{cx} \cdot t < 0,1, \quad (10)$$

где τ_{cx} - эквивалентный поток отказов схемы.

Средний интервал времени между аварийными перерывами электроснабжения узла нагрузки:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda_o + \lambda_s} = \frac{1}{\lambda_{cx}}. \quad (11)$$

Пример расчета. Дана распределительная схема СЭС 6 кВ (рисунок 2).

Параметры надежности электрооборудования СЭС ($\lambda_{i,j}$ и $\mu_{i,j}$) приведены в таблице

1. Среднее время $\tau_{i,j}$ обнаружения отказавшего в срабатывании коммутационного аппарата, отключение его от сети и восстановления электроснабжения узла схемы (шина I) приведены в таблице 2. Учитываются повреждения: системы шин, трансформаторов, кабельных линий, которые приводят к КЗ в электрооборудовании. Для выключателей учитываются два вида отказов: отказ типа “обрыв цепи” и отказ в срабатывании. Проверки системы отключения коммутационных аппаратов вместе с релейной защитой (для выявления скрытых отказов, которые могут привести к отказу в срабатывании коммутационного аппарата) проводятся через $\Theta = 4380$ ч.

Определить: $\lambda_{сж}$ - параметр потока аварийных отключений узла схемы (секция шин I), $R(t)$ - вероятность бесперебойного электроснабжения потребителей секции шин I в течение года $t = 8760$ ч, $T_{ср}$ - средний интервал времени между аварийными перерывами электроснабжения узла схемы и $\tau_{сж}$ - среднее время восстановления электроснабжения узла схемы.

Решение. Ввиду того, что в примере учитываются два несовместных вида отказов выключателей: отказ типа “обрыв цепи” и отказ выключателя в срабатывании, которые на систему электроснабжения действуют различным образом, отдельно составляются схема замещения, в которой учитываются повреждения выключателя типа “обрыв цепи” (рисунок 3,а) и схема замещения, в которой учитываются отказы в срабатывании выключателей отходящих присоединений (рисунок 3,б).

Используя данные таблицы 1, формулы (1) и (2) и схему замещения (рисунок 3,а), находим эквивалентные параметры потоков отказов λ_o и восстановлений μ_o :

$$\lambda_o = \sum_{i=1}^{13} \lambda_i ;$$

$$\lambda_o = 0,056 + 0,097 + 0,072 + 1,12 + 0,87 + 0,276 +$$

$$+ 0,072 + 1,68 + 0,87 + 0,368 + 0,128 + 0,87 + 1,65 = 8,129 \text{ год}^{-1},$$

$$\mu_o = \frac{\sum_{i=1}^{13} \lambda_i}{\sum_{i=1}^{13} \mu_i} = 1584 \text{ год}^{-1},$$

где i - номер сечения для схемы замещения рисунок 3,а.

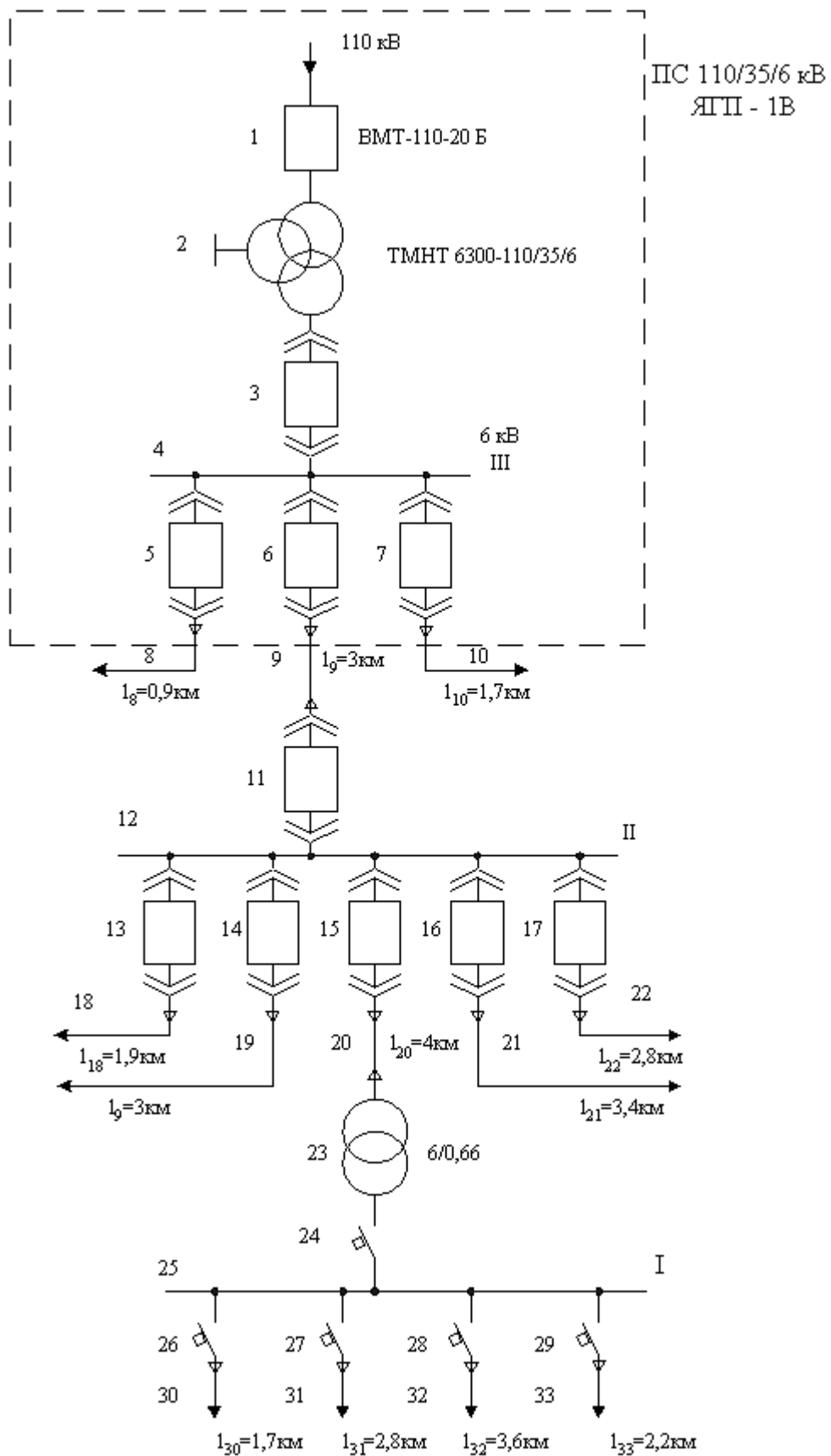


Рисунок 2 - Принципиальная схема электроснабжения УКПГ-1В на Ямбургском ГКМ

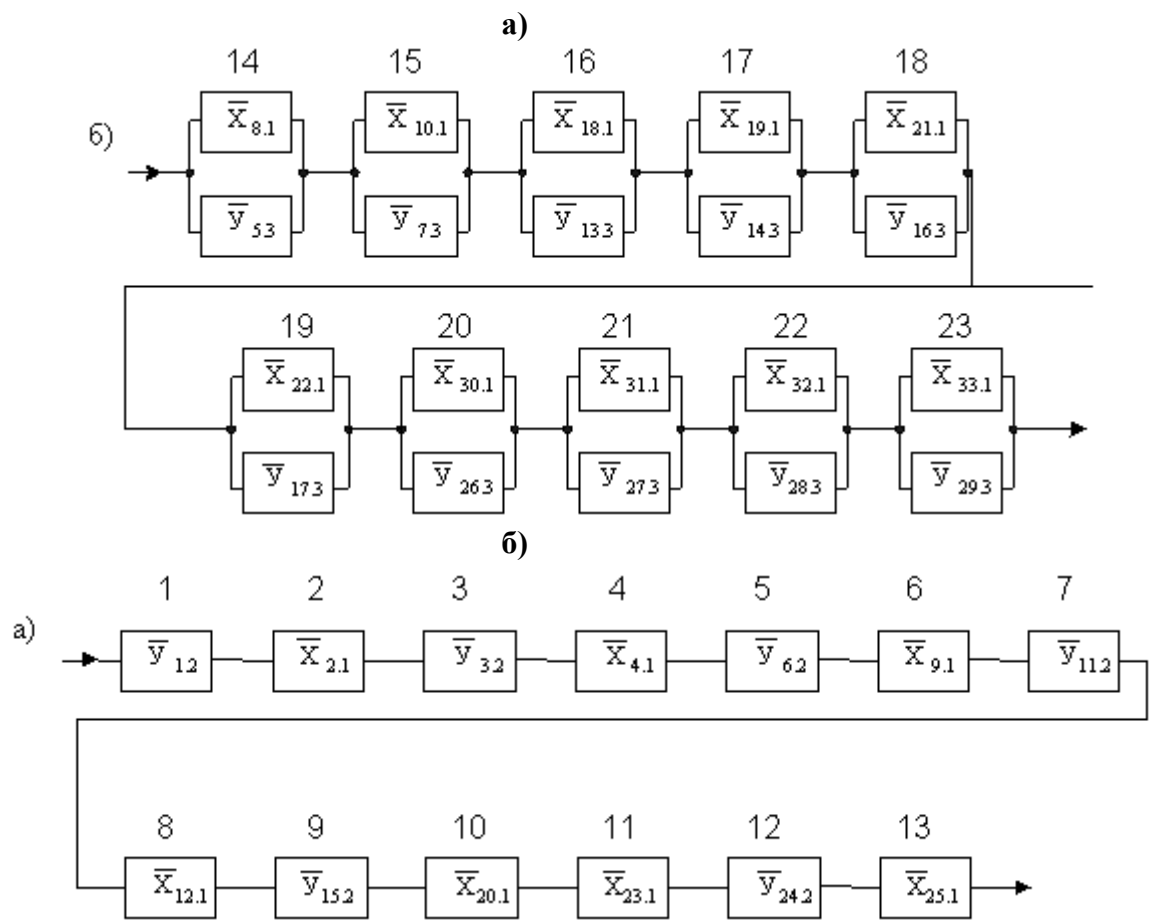


Рисунок 3 - Схемы минимальных сечений для оценки надежности электроснабжения узла схемы I:

а) схема минимальных сечений при учете отказов коммутационных аппаратов типа “обрыв цепи”;

б) схема минимальных сечений при учете отказов в срабатывании коммутационных аппаратов.

Таблица 1 - Параметры надежности элементов схемы

№, k	Код элемента	Параметр потока отказов $\lambda_{i,j} = \lambda_k$, год ⁻¹	Параметр потока восстановлений $\mu_{i,j} = \mu_k$, год ⁻¹	№, k	Код элемента	Параметр потока отказов $\lambda_{i,j} = \lambda_k$, год ⁻¹	Параметр потока восстановлений $\mu_{i,j} = \mu_k$, год ⁻¹
1	\bar{y}_{12}	0,056	292	18	$\bar{x}_{21.1}$	0,313	1095
2	$\bar{x}_{2.1}$	0,097	245	19	$\bar{x}_{22.1}$	0,258	1095
3	$\bar{y}_{3.2}$	0,072	1251	20	$\bar{x}_{30.1}$	3,57	4380
4	$\bar{x}_{4.1}$	1,12	1460	21	$\bar{x}_{31.1}$	5,88	4380
5	$\bar{y}_{6.2}$	0,87	1752	22	$\bar{x}_{32.1}$	7,56	4380

6	$\bar{x}_{9.1}$	0,276	1095	23	$\bar{x}_{33.1}$	4,62	4380
7	$\bar{y}_{11.2}$	0,072	1251	24	$\bar{y}_{5.3}$	0,061	1460
8	$\bar{x}_{12.1}$	1,68	1460	25	$\bar{y}_{7.3}$	0,061	1460
9	$\bar{y}_{15.2}$	0,87	1752	26	$\bar{y}_{13.3}$	0,061	1460
10	$\bar{x}_{20.1}$	0,368	1095	27	$\bar{y}_{14.3}$	0,061	1460
11	$\bar{x}_{23.1}$	0,128	438	28	$\bar{y}_{16.3}$	0,061	1463
12	$\bar{y}_{24.2}$	0,87	2920	29	$\bar{y}_{17.3}$	0,061	1463
13	$\bar{x}_{25.1}$	1,65	2920	30	$\bar{y}_{26.3}$	1,2	4380
14	$\bar{x}_{8.1}$	0,736	1095	31	$\bar{y}_{27.3}$	1,2	4380
15	$\bar{x}_{10.1}$	0,156	1095	32	$\bar{y}_{28.3}$	1,2	4380
16	$\bar{x}_{18.1}$	0,175	1095	33	$\bar{y}_{29.3}$	1,2	4380
17	$\bar{x}_{19.1}$	0,276	1095				

Таблица 2 – Среднее время восстановления электроснабжения секции шин I после отказа в срабатывании г-го коммутационного аппарата

r	$\tau_{i,j} = \tau_r$, год	r	$\tau_{i,j} = \tau_r$, год
5	$1,71 \cdot 10^{-4}$	17	$1,37 \cdot 10^{-4}$
7	$1,71 \cdot 10^{-4}$	26	$1,03 \cdot 10^{-4}$
13	$1,37 \cdot 10^{-4}$	27	$1,03 \cdot 10^{-4}$
14	$1,37 \cdot 10^{-4}$	28	$1,03 \cdot 10^{-4}$
16	$1,37 \cdot 10^{-4}$	29	$1,03 \cdot 10^{-4}$

Поток аварийных отключений секции шин I в результате КЗ в отходящих линиях и отказа в срабатывании соответствующих защитных коммутационных аппаратов определяется по формуле (5) с использованием данных таблицы 1.

Находим параметр потока отказов для минимального сечения номер 14, рисунок 3,б.

$$H_1 = 0,5 \cdot \lambda_{8,1} \lambda_{5,3}^2 \omega_3^2 = 0,5 \cdot 0,083 \cdot 0,061^2 \cdot 0,5^2 = 0,386 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$$

Расчет остальных минимальных сечений заносим в таблицу 3.

Таблица 3 - Расчет значений $H_{14} - H_{23}$

1	$H_i, \text{год}^{-1}$	1	$H_i, \text{год}^{-1}$
14	$0,386 \cdot 10^{-4}$	19	$1,2 \cdot 10^{-4}$
15	$0,725 \cdot 10^{-4}$	20	0,643
16	$0,814 \cdot 10^{-4}$	21	1,058
17	$1,28 \cdot 10^{-4}$	22	1,36
18	$1,45 \cdot 10^{-4}$	23	0,832

Параметр потока аварийных отключений секции шин I схемы (рис. 2) при учете отказов в срабатывании коммутационных аппаратов определяется следующим образом:

$$\lambda_s = \sum_{i=14}^{23} H_i = 3,89 \text{ год}^{-1}$$

Параметр потока аварийного отключения секции шин I из-за отказов типа “обрыв цепи” и отказа в срабатывании выключателей, а также отказов типа “КЗ” в остальных элементах СЭС определяется следующим образом:

$$\lambda_{cx} = \lambda_o + \lambda_s,$$

$$\lambda_{cx} = 8,129 + 3,89 = 12,02 \text{ год}^{-1}$$

Вероятность безотказной работы СЭС за время 8760 ч (1 год):

$$R(8760) = e^{-\lambda_{cx} \cdot 1} = 6,02 \cdot 10^{-6}$$

Средний интервал времени между аварийными отключениями секции шин I определяется следующим образом:

$$T = \frac{1}{\lambda_{cx}} = \frac{1}{12,02} = 0,083 \text{ год}$$

Используя формулу (7), данные таблиц 2 и 3, находим параметр потока восстановлений электроснабжения μ_s узла схемы (секция I):

$$\mu_s = \frac{3,89}{4,00984 \cdot 10^{-4}} = 9701 \text{ год}^{-1}$$

Используя формулу (9) находим τ_{cx} :

$$\tau_{cx} = \frac{8,129 \cdot 9701 + 3,89 \cdot 1584}{1584 \cdot 9701(8,129 + 3,89)} = 4,603 \cdot 10^{-4} \text{ год} = 4,03 \text{ часа}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Рябинин И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем.-2-е изд. - Л.: Судостроение, 1971.-456 с.
2. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем (эффективность и надежность). - М.: Сов. радио, 1977. - 216 с.
3. Фокин Ю.А., Харченко А.М. Расчет надежности систем электроснабжения. – Электричество, 1982, №8, с. 5-10.
4. Константинов Б.А., Лосев Э.А. Логико-аналитический метод расчета надежности восстанавливаемых систем электроснабжения. – Электричество, 1971, № 12, с. 21-25.
5. Синьчугов Ф.И. Основные положения расчета надежности электроэнергетических систем. – Электричество, 1980, № 4, с. 12-16.
6. Лосев Э.А. Отклик на статью Ф.И. Синьчугова. – Электричество, 1981, № 9, с. 72-73.
7. Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 336 с.
8. Фабрикант В.П. О применении теории надежности к оценке устройств релейной защиты. – Электричество, 1965, №9, с. 36-40.
9. Смирнов Э.П. Влияние профилактического контроля на результирующую надежность релейной защиты – Электричество, 1965, №4, с. 11-15.
10. Барзам А.Б. Отклик на статью Э.П. Смирнова. – Электричество, 1967, №8, 83-87.
11. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. - М.: Сов. радио, 1975.- 472 с.
12. Надежность систем электроснабжения / Зорин В.В., Тисленко В.В., Клеппель Ф., Адлер Г. – К.: Выща шк. Головное из-во, 1984. - 192 с.
13. Ковалев А.П., Сердюк Л.И. Метод расчета надежности сложных схем систем электроснабжения с учетом восстановления элементов. - Электричество, 1985, №10, с. 52-53.
14. 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.