

НАДЕЖНОСТЬ ТОКОВЫХ СТУПЕНЧАТЫХ ЗАЩИТ

Перехватов Д.П.

Научный руководитель – к.т.н., профессор Тремясов В.А.

Сибирский федеральный университет

Метод «дерева отказов» (ДО) распространен при исследованиях надежности многокомпонентных технических систем, включая системы управления и защиты электроустановок.

Построение ДО начинается с формулировки конечного события об отказе системы. Конечное событие первого уровня определяется промежуточными событиями второго уровня. Затем для событий второго уровня находятся события третьего уровня и их логические связи (ИЛИ/И) в том же порядке, что и для событий второго и первого уровней. Процесс записи событий и логических связей продолжается до тех пор, пока на всех уровнях не останутся одни события отказов отдельных элементов системы.

Для конкретного ДО виды отказов системы четко определяются с помощью понятия минимального сечения отказов (МСО). МСО – это такая совокупность исходных событий, в котором при удалении любого события оставшиеся события все вместе больше не являются сечением отказа. МСО, состоящее из n исходных событий, называется n -мерным МСО.

Сечения отказов получают, продвигаясь по ДО от исходных событий отказов элементов, обозначенных буквенным кодом (A, B, C, \dots), и связывая их логическими знаками (ИЛИ/И) на каждом из уровней. Таким образом, происходит сворачивание ДО от исходных событий к конечному событию.

Качественный анализ ДО на основе полученной совокупности МСО позволяет определить «узкие» места в системе, из нескольких вариантов выбрать более надежный. При этом информация о надежности отдельных элементов может отсутствовать или быть неполной. Можно также определить значимость того или иного элемента или МСО в целом, т. е. их вклад в появление конечного события.

Переход от ДО к логической функции отказа открывает возможности для анализа причин отказа системы на формальной основе.

Надежность релейной защиты рассчитывается по следующим формулам:

Считаем, что исходные события отказа статистически независимы и тогда для интенсивностей отказов $\lambda(t)$ и восстановлений $\mu(t)$ элементов можно записать $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ и $\mu(t) = \mu = \text{const}$.

Коэффициент простоя для невосстанавливаемого j -го элемента равен

$$q_j(t) = 1 - \exp(-\lambda_j t) \approx \lambda_j t. \quad (1)$$

МСО реализуется, если все исходные события $A_1 \dots A_n$ происходят в нем. Вероятность возникновения i -го МСО в момент времени t – $q_i^*(t)$ получаем при пересечении (конъюнкции) исходных событий:

$$q_i^*(t) = P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n) = \prod_{j=1}^n q_j(t), \quad (2)$$

где n – число членов МСО, а $q_j(t)$ – вероятность наступления j -го исходного события в МСО в момент t . Показатель $\omega_i^*(t)$ – ожидаемое число появлений i -го МСО в единицу времени в момент t – определяется выражением

$$\omega_i^*(t) = \sum_{j=1}^n \omega_j(t) \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^n q_l(t), \quad (3)$$

где $\omega_j(t)$ – параметр потока j -го исходного события в i -м МСО.

Показатель $\lambda_i^*(t)$ – интенсивность появления i -го МСО, определяется через показатели $\omega_i^*(t)$ и $q_i^*(t)$:

$$\lambda_i^*(t) = \frac{\omega_i^*(t)}{[1 - q_i^*(t)]}. \quad (4)$$

Коэффициент простоя системы $q_c(t)$ или $K_{\text{пр}}$ – вероятность того, что конечное событие существует в момент t , т. е. вероятность отказа системы определяется по выражению

$$q_c(t) \cong \sum_{i=1}^{N_{\text{МСО}}} q_i^*(t). \quad (5)$$

где $N_{\text{МСО}}$ – общее число МСО.

Справедливо следующее равенство: $K_{\text{гр}}(t) + K_{\text{пр}}(t) = 1$.

Интенсивность отказа системы $\Lambda_c(t)$, или вероятность того, что конечное событие произойдет в единицу времени в момент времени t при условии, что оно не существует в момент t

$$\Lambda_c(t) = \sum_{i=1}^{N_c} \lambda_i^*(t). \quad (6)$$

Параметр потока отказов системы – $\omega_c(t)$, или вероятность того, что конечное событие происходит в единицу времени в момент t определяется как

$$\omega_c(t) = \sum_{i=1}^{N_c} \omega_i^*(t). \quad (7)$$

Определим методом ДО показатели надежности токовой ступенчатой защиты (ТСЗ) установленной на воздушной ЛЭП1 напряжением 35 кВ со стороны подстанции А (рис.1) Схема токовых цепей защиты и цепи оперативного тока показаны (см. рисунок1а).

Известны значения интенсивностей отказов для каждого элемента защиты. Законы отказов и восстановлений принимаем экспоненциальными. Известна частота коротких замыканий (КЗ) на 100 км длины L_1 и L_2 линий ЛЭП 1 и ЛЭП 2, а также доля трехфазных КЗ в потоке повреждений.

Рассматриваемая схема РЗ не имеет встроенных диагностических устройств, профилактические проверки ее исправности проводятся 1раз в 8 года. При решении данного примера будем считать, что других видов РЗ и противоаварийной автоматики на подстанции А не установлено. При решении задачи отказами соленоида отключения

и привода выключателя, а также отказами источника оперативного тока можно пренебречь.

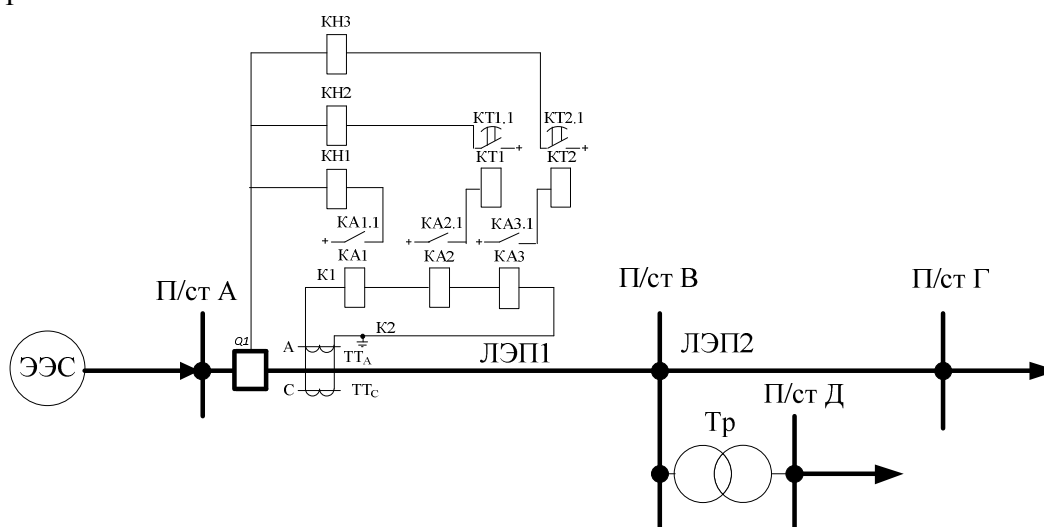


Рисунок 1 – Токовая ступенчатая защита

На схемах рисунок 1 ТТА и ТТс – измерительные трансформаторы тока фаз А и С соответственно; КА1, КА2, КА3 – токовые реле; КТ1, КТ2 – реле времени; КН1, КН2, КН3 – указательные реле; К1, К2 – верхняя и нижняя жилы контрольного кабеля.

Режим трехфазного КЗ на защищаемой ЛЭП 1. Будем считать, что повреждение

нижней жилы кабеля (К3) не приводит к отказу защиты в рассматриваемом режиме. Можно перечислить две основные причины отказа РЗ в функционировании:

- из-за повреждения цепей переменного тока защиты;
- из-за повреждения в цепях оперативного постоянного тока.

При движении по ветви дерева с промежуточным событием «Отказ цепей переменного тока» можно записать такие сочетания отказов элементов, при которых защита отказывает в срабатывании это токовая отсечка КА1, токовая отсечка выдержки времени КА2 и максимальная токовая защита КА3.

Двигаясь дальше по ветви дерева с промежуточным событием «Отказ цепей оперативного тока», выясним, отказы каких элементов в цепях оперативного постоянного тока могут привести к отказу в срабатывании РЗ. Проанализировав схему на рис. 1 получим два ответа: отказ реле КТ1 и КТ2.

Таблица 1 – Показатели надежности элементов релейной защиты

№ п/п	Наименование элементов	Интенсивность отказов, (1/год)		
		отказы в срабатывания	неселективное	ложные
1	Реле тока	0,0001	0,0002	-
2	Реле времени	0,0005	0,0003	-
3	Реле промежуточные	0,0003	0,0001	
4	Кабель	0,0005	0,0002	
5	Трансформаторы тока	0,0003		

ДО для этого режима показано на рис. 2. В результате анализа ДО получены следующие МСО: N_1 –КТ1, N_2 –КТ2 – одномерные; для ТО N_3 –ТТАхК1хКА1, для ТОВВ N_4 –ТТАхК1хКА2, для ТО N_5 –ТТАхК1хКА3– одномерные.

Показатели надежности устройства РЗ линии 1, полученные для режима трехфазного КЗ, представлены в таблице 2.

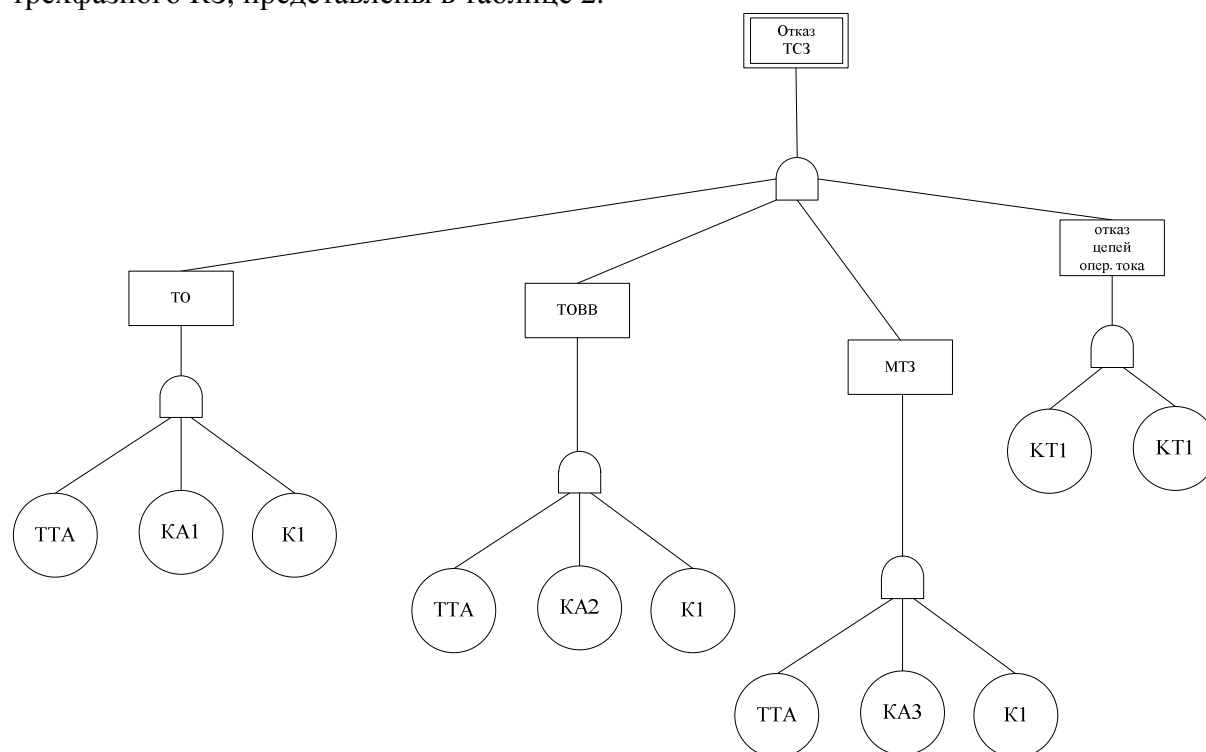


Рисунок 2– Дерево отказов для режима трехфазного КЗ на ЛЭП1

Таблица 2 – Результаты расчета надежности ТСЗ при трехфазном КЗ на ЛЭП 1

Показатели надежности	Сечение					ТСЗ
	1	2	3	4	5	
$q(t)$	4,00E-03	4,00E-03	7,20E-03	7,20E-03	7,20E-03	2,96E-02
$\omega(t)$	2,00E-06	2,00E-06	2,80E-06	2,80E-06	2,80E-06	1,24E-05
$\lambda(t)$	2,01E-06	2,01E-06	2,82E-06	2,82E-06	2,82E-06	1,28E-05

Таким образом, предложенный подход к оценке надежности устройств релейной защиты и автоматики на основе метода ДО, позволяет учесть особенности функционирования таких устройств и получить качественные и количественные показатели надежности, определить ненадежные элементы и предложить более надежные варианты исполнения этих устройств.