

Лабораторная работа № 1

Исследование режима трехфазного короткого замыкания в простейшей цепи

1. *Цель работы:* исследовать влияние режима, предшествующего короткому замыканию (КЗ), и момента возникновения КЗ на слагаемые тока КЗ.

2. Общие положения и расчетные выражения

Теоретический материал изложен в [1, § 3.1-3.3; 2, § 3.1-3.3].

Исследование переходного режима ведется на базе схемы рис.1, состоящей из активно-индуктивных сопротивлений Z_K , $Z_{\text{наг.}}$ и источника неограниченной мощности. Указанный источник характеризуется неизменным напряжением ($U_m = \text{const}$) в любых режимах внешней сети (нормальном или аварийном) и сопротивлением $x=0$. Отсутствие в схеме емкостей исключает возникновение колебательных контуров и упрощает анализ переходного процесса.

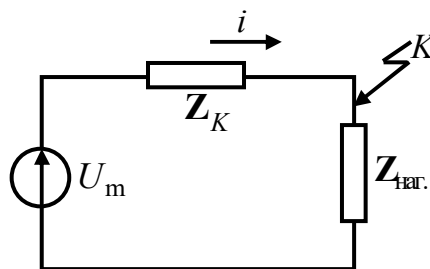


Рис.1. Принципиальная схема

В рассматриваемой схеме закон изменения тока 3-х фазного КЗ в точке K в функции времени (t) описывается выражением [1,2]:

$$i_{iK} = i_{ia(0)} e^{-t/T_a} + I_{\text{Пм}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K + \psi_i), \quad (1)$$

где $i=A, B, C$ – индекс фазы;

$$i_{ia(0)} = [I_{\text{Нм}} \sin(\alpha - \varphi_{\text{н}} + \psi_i) - I_{\text{Пм}} \sin(\alpha - \varphi_K + \psi_i)] = i_{\text{П}i0} - i_{\text{П}i(0)} \quad (2)$$

– начальное значение аperiodической слагаемой тока КЗ (вычисляется для $t=0$), представляет собой разность мгновенных значений периодического тока нормального режима i_0 и периодической слагаемой тока КЗ $i_{(0)}$.

$I_{\text{нм}} = U_{\text{м}} / Z_{\Sigma}$ – амплитуда тока нагрузочного режима, предшествующего режиму КЗ;

$U_{\text{м}}$ – амплитуда фазного напряжения источника питания;

$Z_{\Sigma} = Z_K + Z_{\text{наг.}} = Z_{\Sigma} \exp(j\varphi_{\text{н}})$ – комплексное сопротивление цепи нормального режима в соответствии со схемой рис.1;

$I_{\text{нм}} = U_{\text{м}} / Z_K$ – амплитуда периодической слагаемой тока КЗ;

$Z_K = Z_K \exp(j\varphi_K)$ – комплексное сопротивление цепи в режиме КЗ;

ψ_i – угол сдвига напряжений фаз B и C относительно фазы A ;

($\psi = -120^\circ$ для фазы B и $\psi = 120^\circ$ для фазы C);

$T_a = X_K / \omega R_K$ – постоянная времени затухания аperiodической слагаемой, которая определяется параметрами схемы (X_K и R_K) в режиме КЗ;

ω – угловая скорость трехфазной системы напряжений (токов);

α – угол, определяющий положение вектора напряжения фазы A относительно оси отсчета углов при $t=0$ «фаза включения».

Для принятых условий амплитуда периодической слагаемой тока КЗ остается неизменной и определяется величиной напряжения и удаленностью КЗ. Аperiodическая слагаемая существенно зависит от двух факторов:

- режима предшествующего КЗ ($I_{\text{нм}}$);
- момента возникновения КЗ (значения угла α).

Аperiodическая составляющая является криволинейной осью симметрии полного тока КЗ. В трехфазной сети аperiodическая слагаемая по фазам индивидуальна, при этом возможны условия, когда в одной из фаз она вообще отсутствует. Таким образом, аperiodический ток существенно влияет на полный ток КЗ. Скорость затухания аperiodического тока определяется его постоянной времени T_a и зависит от t .

Существует несколько способов косвенного определения T_a .

1. Подкасательная к любой точке экспоненты (рис.2) в принятом для оси времени масштабе дает значение постоянной времени T_a . Для большей точности точку, в которой проводят касательную, нужно брать в начальной (более крутой) части кривой.

2. Отрезок на оси времени, при котором отношение токов, соответствующее его началу и концу, составляет $e=2,720$, равен постоянной времени T_a (рис.2).

Для практических расчетов важным является режим и условия, при которых мгновенное значение полного тока КЗ (пик тока) достигает

максимального значения (i_y), которое называют ударным током короткого замыкания. Как известно [1,2], для активно-индуктивной цепи это достигается при следующих условиях:

- до КЗ цепь была ненагруженной (режим ХХ, $I_{\text{нм}} = 0$);
- в момент КЗ угол $\alpha = 0$ или 180 (имея в виду фазу A).

Как видно из (2), при этих условиях начальное значение апериодической слагаемой несколько меньше своего максимально возможного значения, равного $|I_{\text{Пм}}|$, а время возникновения ударного тока зависит от φ_K [$t_{\text{уд.}} = (\pi/2 + \varphi_K)/\omega$], что создает определенные неудобства в расчете i_y по (1).

При отсутствии предшествующего тока начальное значение апериодической слагаемой (2) достигает максимума при $\alpha = \pm 90^\circ + \varphi_K$. Для цепей с преобладающей индуктивностью $\varphi_K \approx 90^\circ$, поэтому условие возникновения наибольшей апериодической слагающей и условие, при котором достигается максимум мгновенного значения полного тока, очень близки друг к другу.

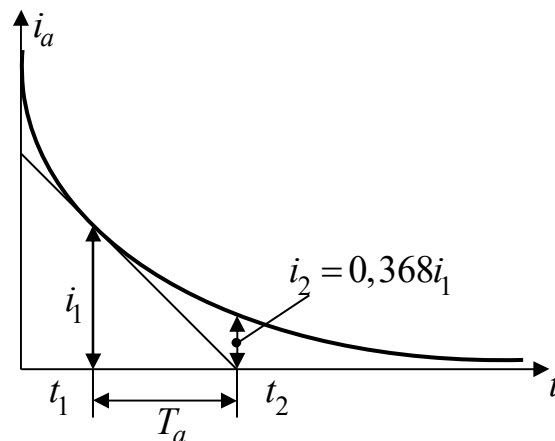


Рис.2. Графическое определение T_a затухающей экспоненты

Поэтому в практических расчетах i_y находят при наибольшем значении апериодической слагаемой, т.е. при $\alpha = \pm 90^\circ + \varphi_K$ и времени $t=0,01$ с после возникновения КЗ:

$$i_y = I_{\text{Пм}} K_y = \sqrt{2} I_{\text{П}} K_y, \quad (3)$$

где $K_y = 1 + e^{-0,01/T_a}$ - ударный коэффициент;

$I_{\text{П}}$ - действующее значение периодической составляющей тока КЗ.

3. Ввод исходных данных

В табл.1 представлены варианты исходных данных

Таблица 1

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8
U, кВ	3	3	3	6	6	6	10	10
L, км	1	2	3	4	5	6	9	10
№ вар.	9	10	11	12	13	14	15	16
U, кВ	10	35	35	35	110	110	110	220
L, км	11	14	15	16	26	28	30	50
№ вар.	17	18	19	20	21	22	23	24
U, кВ	220	220	110	24	13,8	75	13,8	75
L, км	55	60	50	10	9	20	8	22

После запуска программы на экране появляется табл.1.

По запросу необходимо ввести данные, соответствующие заданному варианту:

- действующее значение междуфазного напряжения источника питания, кВ U ;
- длину линии, км L ;
- фазу включения, эл.град. $-90^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$ α .

4. Расчет режимов трехфазного замыкания

В соответствии с принятой схемой (рис.1) специализированной программой рассчитываются:

- амплитуда фазного напряжения источника питания, кВ $U_m = \sqrt{2}U / \sqrt{3}$;
- сопротивление цепи в режиме КЗ, Ом $Z_K = (R_0 + jX_0)L = Z_K \exp(j\varphi_K)$;
- сопротивление нагрузки, Ом $Z_{нар} = 3|Z_K|(0,8 + j0,6)$;
- сопротивление цепи в нормальном режиме, Ом $Z_{\Sigma} = Z_K + Z_{нар}$.

В данной лабораторной работе моделируются два режима КЗ.

1. На интервале времени $-0,006 \text{ с} \leq t \leq 0 \text{ с}$ – нормальный режим. При $t=0$ происходит КЗ с заданной фазой включения α . Режим КЗ рассчитывается по (1) на отрезке времени $0 \leq t \leq 0,022 \text{ с}$.

2. До КЗ – холостой ход. В момент КЗ ($t=0$) начальное значение апериодической слагаемой имеет максимально возможное значение, равное $I_{\text{Пм}}$ при фазе включения $\alpha = -90^\circ + \varphi_K$.

5. Результаты расчета

На печать выводятся исходные данные по принятому варианту и результаты экспериментов.

По первому эксперименту (табл.2) выводятся токи для фаз A, B, C в функции времени.

Таблица 2

Нагрузочный режим, токи фаз A, B, C

$t, \text{ с}$	Фаза A			Фаза B	Фаза C
	$I_{\text{пер}}, \text{ кА}$	$I_{\text{апер}}, \text{ кА}$	$I_{\text{КЗ}}, \text{ кА}$	$I_{\text{пер}}, \text{ кА}$	$I_{\text{пер}}, \text{ кА}$

Дополнительно вне табличной формы выводятся:

- амплитуда фазного напряжения, кВ U_m ,
- амплитуда тока нормального режима, кА $I_{\text{нм}}$,
- угол сдвига тока нормального режима к напряжению, град. φ_n ,
- амплитуда периодической составляющей тока КЗ, кА $I_{\text{Пм}}$,
- угол сдвига периодической составляющей тока к напряжению, град φ_K .

По второму эксперименту (табл.3) для фазы A выводятся слагаемые тока КЗ, полный ток КЗ и фаза включения.

Таблица 3

До КЗ – режим холостого хода

$t, \text{ с}$	$I_{\text{пер}}, \text{ кА}$	$I_{\text{апер}}, \text{ кА}$	$I_{\text{КЗ}}, \text{ кА}$

6. Задание по обработке экспериментов и оформлению отчета

К отчету приложить распечатку результатов экспериментов, нарисовать на рис.1 принципиальную схему, принятую для исследования.

По данным эксперимента 1 (результатам табл.2):

1. На рис.2 «Осциллограмма токов фазы A » построить в координатах I, t составляющие токов фазы « A » и определить постоянную времени затухания апериодического тока (T_a).

2. Для фаз B и C , основываясь на первом законе коммутации, определить начальные значения апериодических слагаемых токов КЗ согласно выражения (2).

Рассчитать $i_a = F(t)$ для фаз B и C , используя найденное в п.1 значение T_a . Построить осциллограммы токов $i_{II}, i_a, i_K = F(t)$ для фазы B и фазы C (рис.3). Для всех фаз найти максимальное мгновенное значение тока КЗ $i_{m(кз)}$ и время его возникновения t_m .

3. Построить (рис.5) векторную диаграмму напряжений и токов для фаз A, B, C для начального момента трехфазного КЗ в координатах «ось времени»-«ось отсчета углов». Дополнить диаграмму векторами $(I_{нм} - I_{Пм})$ и выделить на оси времени t отрезки $i_{a(0)}$.

По данным эксперимента 2 (результатам табл.3):

4. Построить (рис.4) осциллограмму токов для режима ХХ до КЗ, обозначив все токи и их начальные значения.

5. На рис.6 построить векторную диаграмму тока и напряжения в координатах «ось времени»-«ось отсчета углов».

6. Графическим путем найти T_a и рассчитать K_y, i_y .

7. Сделать выводы по сопоставительному анализу токов для проведенных экспериментов.

8. Ответить письменно на вопросы

8.1. Как зависит скорость затухания i_a от T_a и t ?

- 8.2. Из каких условий в активно-индуктивной цепи находится $i_{a(0)}$?
- 8.3. Рассчитайте значение I_y (наибольшее действующее значение тока КЗ).
- 8.4. Назовите расчетные условия для практического расчета K_y ?
- 8.5. Во сколько раз уменьшится i_a за время $3T_a$?

Литература

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1964. – 518 с., 1970. – 518 с.
2. Борисов Р.И., Готман В.И. Основы переходных процессов в электрических системах. – Томск: Изд. ТПИ, 1969. – 388 с.
3. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах. – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2003. – 283 с.
4. Готман В. И. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 240 с.