

## 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.

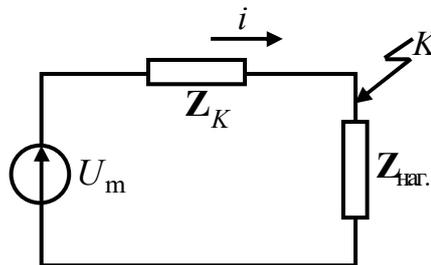


Рис.1. Принципиальная схема

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 апериодической 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;

$\psi_i$  – 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;

$\omega$  – угловая скорость трехфазной системы напряжений (токов);

$\alpha$  – 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  $\alpha$ ).

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  $\varphi_K$  [ $t_{\text{уд.}} = (\pi/2 + \varphi_K)/\omega$ ], 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.

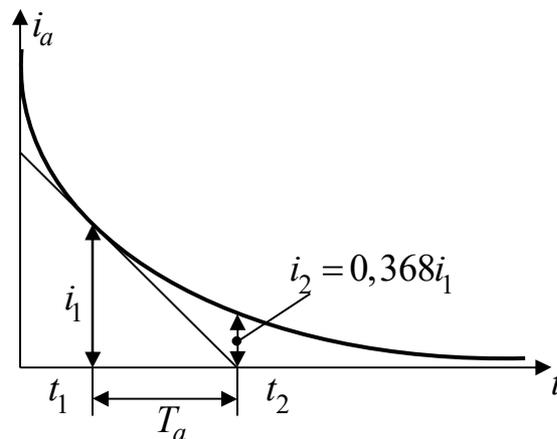


Рис.2. Графическое определение  $T_a$  затухающей экспоненты

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.  $-90^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$   $\alpha$ .

### 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  $\alpha$ . 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.  $\varphi_n$ ,
- амплитуда периодической составляющей тока КЗ, кА  $I_{\text{Пм}}$ ,
- угол сдвига периодической составляющей тока к напряжению, град  $\varphi_K$ .

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.