

## Лабораторная работа №3

### Распределение симметричных составляющих напряжений при несимметричных коротких замыканиях

*1. Цель работы: исследовать закономерности распределения симметричных составляющих остаточных напряжений в узлах схемы при несимметричных коротких замыканиях (КЗ).*

#### 2. Общие положения и расчетные выражения

Теоретический материал изложен в [1, §13.5; 2, §9.19; 3, §5].

Несимметричные КЗ в электрических системах приводят к нарушению симметрии фазных и линейных величин токов и напряжений. Моделирование несимметричных режимов можно осуществить методом симметричных составляющих, используя системы прямой, обратной и нулевой последовательностей. Тогда интересующие несимметричные величины фазных токов и напряжений будут представлены геометрической суммой соответственно токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей. Согласно принципу независимости действия симметричных составляющих каждая из трех последовательностей может рассматриваться автономно.

Для симметричных составляющих остаточных напряжений двух соседних узлов  $i$  и  $j$ , связанных между собой в схеме прямой последовательности через  $x_1$  и в схеме обратной и нулевой последовательностей соответственно через  $x_2$  и  $x_0$ , справедливы уравнения Кирхгофа (в относительных единицах):

$$\left. \begin{aligned} U_{1j} &= U_{1i} + I_{1j} jx_1, \\ U_{2j} &= U_{2i} + I_{2j} jx_2, \\ U_{3j} &= U_{3i} + I_{3j} jx_3. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Положительное направление тока принято от узла  $j$  к узлу  $i$ .

Эти уравнения (1) и определяют характер распределения симметричных составляющих напряжений в схеме в зависимости от симметричных составляющих токов и соответствующих значений сопротивлений элементов для различных последовательностей токов.

Фазные значения напряжений определяются геометрической суммой ее симметричных составляющих:

$$U_i = U_{1i} + U_{2i} + U_0, \quad (2)$$

где  $i = A, B, C$  – индекс фазы.

Для перевода фазных величин напряжения (равно как и симметричных составляющих) из относительных единиц в именованные используют коэффициент  $U_{\text{л}}/\sqrt{3}$ , где  $U_{\text{л}}$  (кВ) – действующее значение междуфазного (линейного) базисного напряжения соответствующей ступени трансформации.

При переходе через трансформатор симметричные составляющие напряжения прямой и обратной последовательностей изменяются не только по величине, но и по фазе в зависимости от группы ( $N$ ) соединения его обмоток. Уравнения связи симметричных составляющих напряжений на выводах трансформатора с соединением обмоток звезда-треугольник в системе относительных единиц запишутся так

$$U_{1\Delta} = U_{1Y} \cdot e^{-j30^\circ N}, \quad (3)$$

$$U_{2\Delta} = U_{2Y} \cdot e^{+j30^\circ N}.$$

При этом имеется в виду, что  $U_{1Y}$ ,  $U_{2Y}$  включают падение напряжения в трансформаторе, т.е.  $U_{\Delta}$  и  $U_Y$  соответствуют одному и тому же узлу схемы.

Уравнения (3) справедливы и при переходе со стороны треугольника на сторону звезды, при этом угловые смещения симметричных составляющих меняют свой знак на противоположный.

Исследование режимов КЗ в настоящей работе ведется на основе схемы (рис.1), в которой последовательно соединены генератор, трансформатор и высоковольтная ЛЭП.

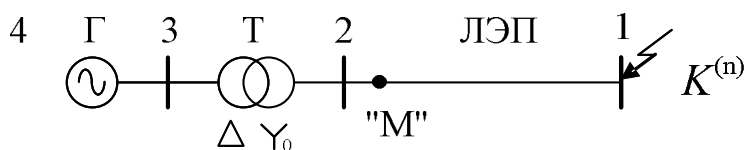


Рис. 1. Принципиальная схема электропередачи

Примечание:

1, 2, 3, 4 - номера узлов схемы

### 3. Ввод исходных данных

В табл. 1 представлены варианты исходных данных.

Таблица 1

№ вар.	1	2	3	4	5	6
$S_{ГНОМ}$ , МВА	21,5	26,3	30	37,5	40	50
$x_d''$ , о.е.	0,225	0,227	0,2	0,24	0,225	0,232
$U_{ГНОМ}$ , кВ	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
$S_{ТР}$ , МВА	25		40			63
$U_K$ , %	10,5		10,5			14
$U_{НВ}$ , кВ	115		115			37,5
$U_{НН}$ , кВ	10,5		10,5			10,5
$L$ , км	50		80			30
№ вар.	7	8	9	10	11	12
$S_{ГНОМ}$ , МВА	56,3	65,5	71,5	77,5	80	100
$x_d''$ , о.е.	0,2	0,16	0,21	0,28	0,24	0,19
$U_{ГНОМ}$ , кВ	10,5	15,75	13,8	13,8	13,8	15,75
$S_{ТР}$ , МВА	63	63	100			100
$U_K$ , %	14	14	12			12
$U_{НВ}$ , кВ	37,5	38,5	230			230
$U_{НН}$ , кВ	10,5	15,75	13,8			15,75
$L$ , км	30	30	100			120

После запуска программы на экране появляется табл. 1. В соответствии с заданным вариантом по запросу необходимо последовательно ввести числовые значения параметров схемы. Разделительным знаком для дробных величин необходимо использовать точку.

### 4. Расчет симметричных составляющих напряжений

При расчетах режимов КЗ приняты следующие условия по параметрам схемы:

$E_G'' = 1,1$  (о.е.) – значение сверхпереходной ЭДС для всех вариантов;

$x_{Г1} = x_{Г2} = x_d''$  (о.е.);

$R = 0$  – для всех элементов схемы;

$x_{1(L)} = 0,4$  (Ом/км) – погонная реактивность ЛЭП в схеме прямой последовательности;

$x_{0(L)} = 3 \cdot x_{1(L)}$  – погонная реактивность ЛЭП в схеме нулевой последовательности.

В данной работе моделируются три несимметричных режима КЗ: двухфазное; двухфазное на землю; однофазное, которые происходят в точке  $K^{(n)}$  схемы (рис. 1). Расчет осуществляется аналитическим методом в системе относительных единиц. При  $S_G = S_{Г\text{ ном}}$ ;  $U_{Gi} = U_{НВ}$ ;  $U_{НН}$  трансформатора. В качестве “особой” фазы принята фаза «А».

### 5. Результаты расчета

На печать выводятся исходные данные по принятому варианту согласно следующему списку:

- |  |                         |
|--|-------------------------|
| • мощность генератора                      | $S_{Г\text{ ном}}$ МВА; |
| • сверхпереходное сопротивление генератора | $x_d''$ о.е.;           |
| • напряжение генератора                    | $U_{Г\text{ ном}}$ кВ;  |
| • мощность трансформатора                  | $S_{ТР}$ МВА;           |
| • напряжение КЗ трансформатора             | $U_K$ %;                |
| • напряжение трансформатора на стороне ВН  | $U_{НВ}$ кВ;            |
| • напряжение трансформатора на стороне НН  | $U_{НН}$ кВ;            |
| • длина линии электропередачи              | $L$ км.                 |

Симметричные составляющие фазных напряжений в узлах схемы в о.е. (табл.2).

Таблица 2

Результаты расчета симметричных составляющих напряжений

№ узла	1	2	3	4
двухфазное КЗ				
$U_1$ , о.е.				
$U_2$ , о.е.				
двухфазное КЗ на землю				
$U_1$ , о.е.				
$U_2$ , о.е.				
$U_0$ , о.е.				

однофазное КЗ				
$U_1$ , о.е.				
$U_2$ , о.е.				
$U_0$ , о.е.				

## 6. Задание по обработке экспериментов

1. На рис. 1 изобразить принципиальную схему электропередачи и по данным табл. 2 построить эпюры распределения симметричных составляющих напряжений в о.е. для всех видов КЗ (в масштабе).

2. Для узла «М» ЛЭП, расположенного на удалении  $mL$  от места КЗ ( $m$  – относительная удаленность узла «М»), по данным табл. 2 рассчитать симметричные составляющие напряжений в относительных и именованных единицах для вида КЗ и значения « $m$ », указанных в табл.3.

3. Для узла 3 принципиальной схемы определить фазы симметричных составляющих напряжений с учетом группы ( $N$ ) соединения обмоток трансформатора для КЗ согласно данным табл. 3.

4. На рис. 2 построить векторные диаграммы симметричных составляющих, и фазных напряжений в именованных единицах для узла 2 и для узла 3 с учетом фазового смещения векторов.

5. Рассчитать симметричные составляющие токов в именованных единицах для КЗ, указанного в табл. 3, пользуясь данными табл.2, уравнениями (1) и данными, приведенными в разделе 4 настоящего описания. По результатам на рис.3 построить векторную диаграмму токов.

Таблица 3

Данные для выполнения п. 2–5 задания

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$m$ , о.е.	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,3	0,4	0,5	0,6
вид КЗ	1	2	1,1	1	2	1,1	1	2	1,1	1	2	1,1
$N$	3	3	9	9	11	11	9	9	3	3	11	11
номер группы соединения обмоток трансформаторов												

## 7. Ответить письменно на контрольные вопросы

7.1 Почему соотношения между симметричными составляющими напряжений в месте КЗ отличаются от аналогичных соотношений в прочих узлах схемы?

7.2 Что является источником токов обратной и нулевой последовательностей?

7.3 При каких условиях справедлив принцип независимости действия симметричных составляющих?

7.4 Каким образом определяется фазовый сдвиг векторов  $U$  и  $I$  при переходе через трансформатор?

### 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. Готман В. И. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учеб. пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 240 с.