

УДК 62-50:519.216

## ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ВОЗДУШНЫХ СЕТЯХ

**ВИШТИБЕЕВ А.В.**

*Новосибирский Государственный Технический Университет*

В статье рассмотрено влияние переходного сопротивления в месте однофазного замыкания на землю ( $R_3$ ) на режимные параметры в воздушных сетях 35 кВ. Показано, что величина  $R_3$  весьма существенно влияет на чувствительность защит от однофазных замыканий на землю.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Важнейшим параметром защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), действует она на сигнал или на отключение, является переходное сопротивление в месте замыкания. Это параметр влияет на эффективность использования защиты в сетях с любым заземлением нейтрали. Так как резистивное заземление нейтрали позволяет построить простую и удобную в эксплуатации защиту от ОЗЗ, в статье рассматриваются сети, содержащие одноцепные и двухцепные ВЛ, с целью анализа возможности обеспечения достаточной чувствительности и селективности релейной защиты от ОЗЗ, реагирующей на стационарные токи и напряжения нулевой последовательности.

### ТИПОВАЯ СХЕМА СЕТИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМА ОЗЗ

Исследования проводились применительно к типовой сети 35 кВ, питаемой от двухтрансформаторной подстанции (рис. 1). Как правило, такие сети эксплуатируются при раздельной эксплуатации цепей ВЛ в схеме нулевой последовательности (разъединитель Р и выключатель В - отключены).

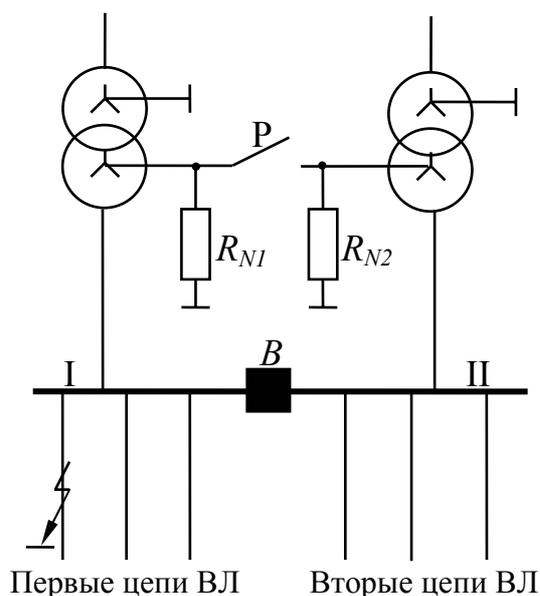


Рис. 1.

Расчетная схема сети

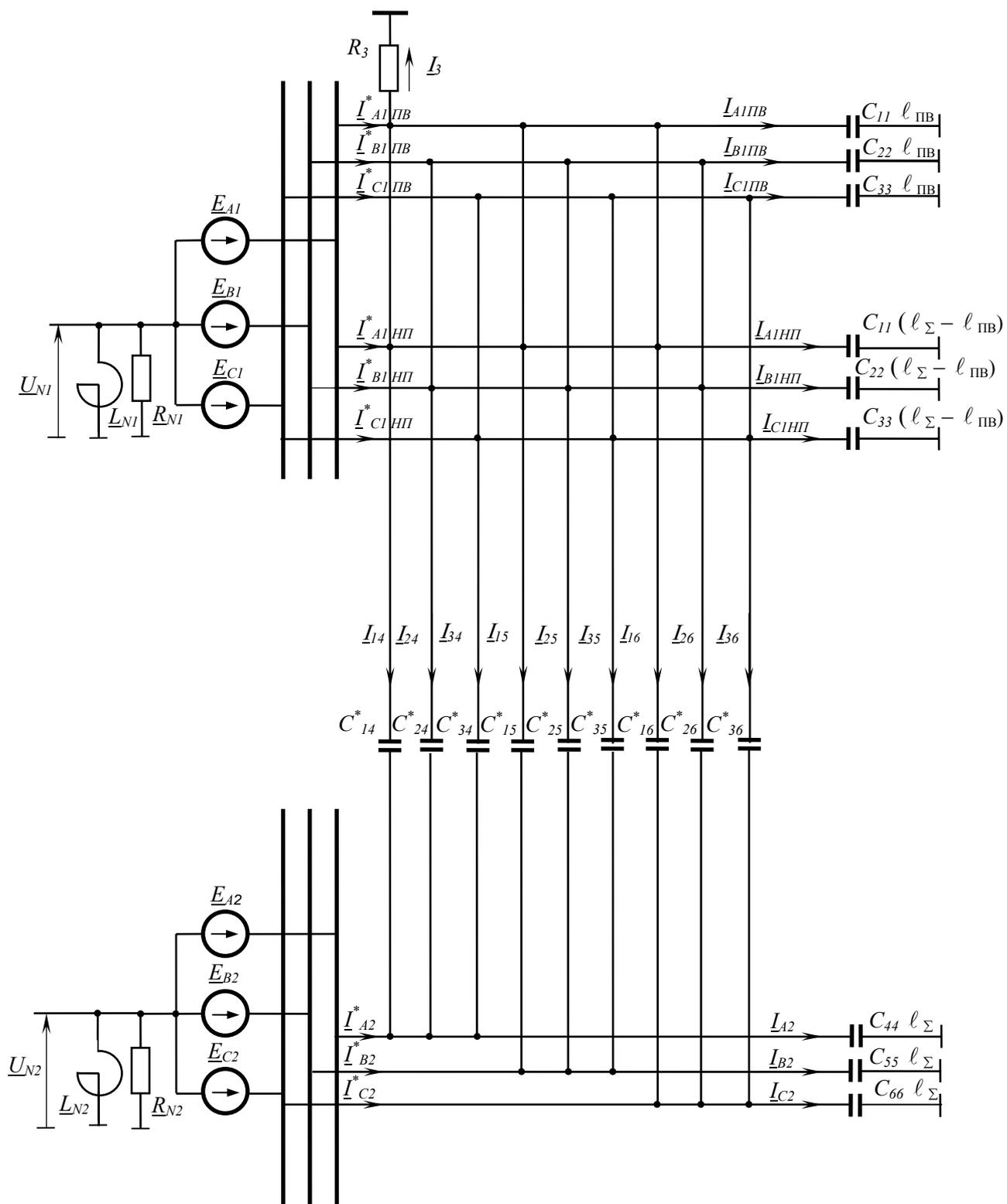


Рис. 2.

В сети содержащей одноцепные ВЛ, релейная защита должна быть надежно отстроена от токов, протекающих по неповрежденным ВЛ. В сети, содержащей двухцепные ВЛ, защита также должна быть отстроена от токов, протекающих по неповрежденной цепи аварийной двухцепной ВЛ.

Расчетная схема сети для определения токов и напряжений нулевой последовательности изображена на рис. 2.

В этой схеме представлены три группы линий:

- линия (цепь), на которой произошло замыкание на землю ( $I'$ );
- остальные линии, присоединенные к той же секции шин, что и поврежденная линия ( $I''$ );
- группа линий, присоединенных ко второй секции шин ( $II$ ).

Поврежденная и неповрежденные цепи ВЛ, примыкающие ко второй секции шин, связаны между собой межцепными емкостями. Цепи ВЛ расположены на опорах вертикально.

На рис. 2 приняты следующие обозначения: 1, 2 и 3 - первая цепь; 4, 5 и 6 - вторая цепь; 1 и 4 - верхние провода, 2 и 5 - средние, 3 и 6 - нижние.

Токи нулевой последовательности, текущие в местах установки реле (на схеме помечены звездочками), определяются как:

$$\begin{aligned} 3I_{01ПВ} &= j\omega l_{ПВ} [\underline{U}_{N1} C_1 + C_{МЦ}] - \underline{U}_{N2} C_{МЦ} + \underline{E}_A C_{11} + \underline{E}_B C_{22} + \underline{E}_C C_{33} + I_3; \\ 3I_{01НПВ} &= (3I_{01ПВ} - I_3) (l_{\Sigma} - l_{ПВ}) / l_{ПВ}; \\ 3I_{02\Sigma} &= j\omega l_{\Sigma} [\underline{U}_{N1} C_{МЦ} - \underline{U}_{N2} (C_1 + C_{МЦ}) - \underline{E}_A C_{11} - \underline{E}_B C_{22} - \underline{E}_C C_{33}]; \\ C_1 &= C_{11} + C_{22} + C_{33}, C_{МЦ} = C_{14} + C_{15} + C_{16} + C_{24} + C_{25} + C_{26} + C_{34} + C_{35} + C_{36}, \end{aligned}$$

где  $C_{ii}$  - погонная собственная емкость провода  $i$  на землю,  $C_{ij}$  - погонная взаимная емкость между проводами  $i$  и  $j$ .

Напряжения на нейтралях  $\underline{U}_{N1}$  и  $\underline{U}_{N2}$  в схеме рис. 2 определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} U_{N1} &= \frac{-E_A g_3 (Y_{\Sigma} + g_N + Y_{МЦ}) - I_{НС} (Y_{\Sigma} + g_N + 2Y_{МЦ})}{g_3 (Y_{\Sigma} + g_N + Y_{МЦ}) + (Y_{\Sigma} + g_N) (Y_{МЦ} + Y_{\Sigma} + g_N) + Y_{МЦ} (Y_{\Sigma} + g_N)}; \\ U_{N2} &= \frac{U_{N1} Y_{МЦ} - I_{НС}}{Y_{МЦ} + Y_{\Sigma} + g_N}, \end{aligned}$$

где  $Y_{\Sigma} = j\omega l_{\Sigma} (C_1 + C_{МЦ})$ ,  $I_{НС} = j\omega l_{\Sigma} (\underline{E}_A C_{11} + \underline{E}_B C_{22} + \underline{E}_C C_{33})$ ,  $Y_{МЦ} = j\omega l_{\Sigma} C_{МЦ}$ ,  $g_3 = 1/R_3$ ,  $g_N = 1/R_N$ .  $R_3$  и  $R_N$  - переходное сопротивление в месте ОЗЗ и сопротивление резистора в нейтрали каждого силового трансформатора.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА ОЗЗ

При анализе влияния величины переходного сопротивления в месте ОЗЗ на величины напряжений нейтралей  $U_{N1}$  и  $U_{N2}$  переходное сопротивление изменялось в диапазоне 30-10000 Ом, суммарная длина ВЛ принималась 10, 50 и 100 км. Расчеты были проведены для четырех случаев: к районной подстанции, нейтрали которой либо изолированы, либо заземлены, примыкают либо одноцепные, либо двухцепные ВЛ.

Величины сопротивлений резисторов были выбраны, исходя из требования практического разряда емкостей цепей после погасания дуги за время порядка половины периода промышленной частоты при ОЗЗ -  $R_N = 1/3 \omega C (1 + 2\eta)$  [1,2].

Результаты расчетов сведены в табл. 1-4.

Таблица 1.

## Двухцепные линии, изолированная нейтраль

$R_3$ , Ом	30	1000	5000	10000
$l_{\Sigma}=10$ км				
$U_{N1}$ , кВ	20.19	20.07	19.15	17.38
$U_{N2}$ , кВ	7.36	7.35	7.16	6.69
$l_{\Sigma}=50$ км				
$U_{N1}$ , кВ	20.18	19.15	11.52	5.94
$U_{N2}$ , кВ	7.36	7.16	4.88	3.04
$l_{\Sigma}=100$ км				
$U_{N1}$ , кВ	20.16	17.37	5.94	2.11
$U_{N2}$ , кВ	7.36	6.69	3.04	1.77

Таблица 2.

## Одноцепные линии, изолированная нейтраль

$R_3$ , Ом	30	1000	5000	10000
$l_{\Sigma}=10$ км				
$U_{N1}$ , кВ	20.19	20.06	19.29	17.97
$l_{\Sigma}=50$ км				
$U_{N1}$ , кВ	20.18	19.29	13.75	8.21
$l_{\Sigma}=100$ км				
$U_{N1}$ , кВ	20.16	18.35	9.56	4.38

Таблица 3.

## Двухцепные линии, резистивно-заземленная нейтраль

$R_3$ , Ом	30	1000	5000	10000
$l_{\Sigma}=10$ км, $R_N=18700$ Ом				
$U_{N1}$ , кВ	20.16	18.97	14.96	11.52
$U_{N2}$ , кВ	5.25	4.95	3.96	3.11
$l_{\Sigma}=50$ км, $R_N=3700$ Ом				
$U_{N1}$ , кВ	20.01	14.92	6.28	3.1
$U_{N2}$ , кВ	5.19	3.93	1.83	1.13
$l_{\Sigma}=100$ км, $R_N=1870$ Ом				
$U_{N1}$ , кВ	19.82	11.52	3.12	1.03
$U_{N2}$ , кВ	5.17	3.11	1.15e	0.79

Таблица 4.

## Одноцепные линии, резистивно-заземленная нейтраль

$R_3$ , Ом	30	1000	5000	10000
$l_{\Sigma}=10$ км, $R_N=28000$ Ом				
$U_{N1}$ , кВ	20.17	19.37	16.43	13.54
$l_{\Sigma}=50$ км, $R_N=5500$ Ом				
$U_{N1}$ , кВ	20.07	16.39	8.17	4.23
$l_{\Sigma}=100$ км, $R_N=2800$ Ом				
$U_{N1}$ , кВ	19.92	14.15	5.03	2.303

На рис. 3 приведены зависимости  $U_{N1}$  и  $U_{N2}$  от  $R_3$  при суммарной длине ВЛ  $l_{\Sigma} = 50$  км для всех расчетных случаев.

Зависимость  $U_{N1}$  и  $U_{N2}$  от  $R_3$

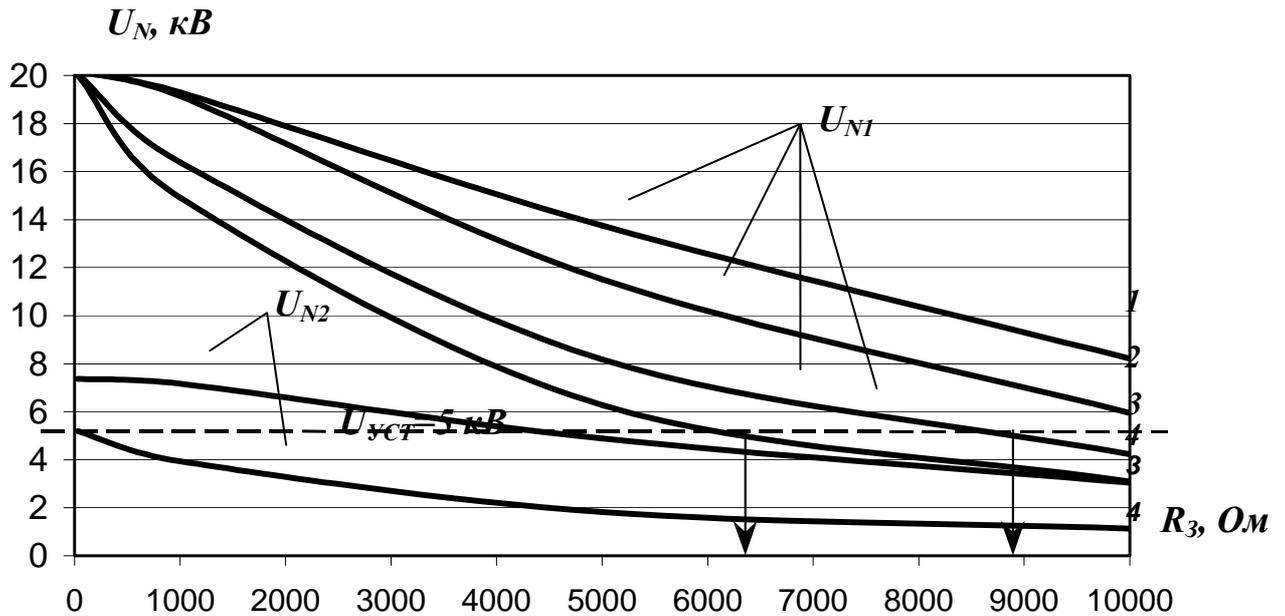


Рис. 3.

1 – одноцепные линии, изолированная нейтраль; 2 – одноцепные линии, резистивно-заземленная нейтраль; 3 – двухцепные линии, изолированная нейтраль; 4 – двухцепные линии, резистивно-заземленная нейтраль

Анализ табл. 1-4 и рис.3 убедительно доказывает, что величина переходного сопротивления в месте замыкания на землю весьма существенно влияет на чувствительность защит, связанных с обнаружением ОЗЗ, основанных на регистрации напряжения нейтрали.

Из рисунка видно, что при примыкании к ОРУ одноцепных ВЛ, напряжение на нейтрали секции, к которой примыкает поврежденная цепь ВЛ, превышает соответствующее напряжение при примыкании двухцепных ВЛ. В случае двухцепных ВЛ в области значений сопротивления  $R_3$ , в которой удастся достаточно надежно распознать ОЗЗ, ориентируясь на напряжение нейтрали, напряжение на нейтрали поврежденной секции более, чем в 2.5 раза превышает соответствующее напряжение на нейтрали неповрежденной секции.

В сети 35 кВ  $l_{\Sigma}=50$  км, содержащей двухцепные ВЛ, превышение уровня напряжения на нейтрали  $U_{N1}$  выше 5 кВ (минимальной уставки сигнализации ОЗЗ) достигается в случае изолированной нейтрали при  $R_3=9000$  Ом, в случае резистивно-заземленной нейтрали при  $R_3=6500$  Ом. Следовательно, при оснащении нейтрали сети резисторами понижается чувствительность защит от ОЗЗ, основанных на регистрации напряжения на нейтрали. Поэтому более предпочтительными являются защиты, реагирующие на токи нулевой последовательности.

Оценка влияния величины сопротивления в месте ОЗЗ на величины токов нулевой последовательности, протекающих как по поврежденной цепи ( $3I_{01ПВ}$ ), так и по неповрежденным фазам поврежденной ( $3I_{01НП}$ ) и неповрежденной ( $3I_{02}$ ) цепей, проводилась применительно к типовой сети 35 кВ. Наименьшая разница в токах нулевой последовательности, протекающих по поврежденной и неповрежденным цепям двухцепной ВЛ, будет наблюдаться при замыкании на наиболее короткой ВЛ. Наибольшие токи на ВЛ, отходящих от неповрежденной секции шин, будут протекать по наиболее протяженной ВЛ. В табл. 5 и 6 приведены разности фазовых углов, напряжения и токи, протекающие через обмотки реле в сети 35 кВ общей

протяженностью 100 км при ОЗЗ на ВЛ длиной 8 км. Длина ВЛ, примыкающей к неповрежденной секции шин, на которой регистрировались токи  $3I_{0ИП}$  и  $3I_{02}$ , составляла 40 км. Сопротивление резистора в нейтрали  $R_N=1870$  Ом.

Таблица 5.

Нейтрали сети изолированы

Параметры режима	$R_3, \text{ Ом}$									
	0		1000		2000		5000		10000	
	<i>mod</i>	<i>arg</i>	<i>mod</i>	<i>arg</i>	<i>mod</i>	<i>arg</i>	<i>mod</i>	<i>arg</i>	<i>mod</i>	<i>arg</i>
$U_{N1}, \text{ кВ}$	20.2	180	17.35	155	13.25	135.5	5.87	107	2.02	8
$U_{N2}, \text{ кВ}$	7.43	174	6.73	147	5.46	126.2	2.9	94.57	1.68	71
$I_3, \text{ А}$	9.6	83.2	8.74	58.7	7.09	41	3.86	16.9	2.06	5.6
$3I_{0ПВ}, \text{ А}$	8.93	82.8	8.15	58.6	6.64	40.8	3.64	17.8	1.79	7.7
$3I_{0ИП}, \text{ А}$	3.4	267	2.96	243.4	2.31	226	1.13	201.6	0.62	190
$3I_{02}, \text{ А}$	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-
$\frac{I_{0ПВ}}{I_{0ИП}}$	2.63	-	2.75	-	2.87	-	2.85	-	2.88	-

Таблица 6.

Нейтрали сети заземлены через резисторы

Параметры режима	$R_3, \text{ Ом}$									
	0		1000		2000		5000		10000	
	<i>mod</i>	<i>arg</i>	<i>mod</i>	<i>arg</i>	<i>mod</i>	<i>arg</i>	<i>mod</i>	<i>arg</i>	<i>mod</i>	<i>arg</i>
$U_{N1}, \text{ кВ}$	20.2	180	11.5	161	7.54	151.5	3.12	138	1.04	126
$U_{N2}, \text{ кВ}$	5.3	224	3.11	199.5	2.14	188.6	1.15	188	0.8	270
$I_3, \text{ А}$	16.4	46.7	9.9	28.9	6.91	20.4	3.56	10.5	1.95	13.1
$3I_{0ПВ}, \text{ А}$	15.85	44.5	9.6	26.6	6.7	18	3.38	8.3	1.88	3.5
$3I_{0ИП}, \text{ А}$	3.7	263.5	2.05	245	1.3	236	0.59	233.5	0.3	215.4
$3I_{02}, \text{ А}$	1.13	224.2	0.67	198.5	0.46	188.6	0.24	188	0.13	270
$\frac{I_{0ПВ}}{I_{0ИП}}$	4.28	-	4.68	-	5.15	-	5.73	-	6.27	-
$\varphi_{ПВ}^I - \varphi_{ИП}^I$	-	-219	-	-218.4	-	-218	-	-215.2	-	-211.9
$\frac{I_{0ПВ}}{I_{02}}$	12.4	-	14.3	-	14.6	-	14.08	-	14.39	-
$\varphi_{ПВ}^{II} - \varphi_{ИП}^{II}$	-	-179.7	-	-171.9	-	-170.6	-	-179.7	-	-266.5

Сравнение данных, приведенных в табл. 5 и 6, показывает, что оснащение нейтралей резисторами привело как к увеличению токов нулевой последовательности в поврежденной цепи (повышение чувствительности), так и к повышению селективности: отношение токов нулевой последовательности в поврежденной и неповрежденной цепях ВЛ, примыкающих к поврежденной секции, увеличилось более, чем в 1.5 раза. Это отношение практически не зависит от величины переходного сопротивления в месте замыкания для режима изолированной нейтрали.

Для режима резистивно-заземленной нейтрали с ростом  $R_3$  отношение  $I_{0ПВ}/I_{0ИП}$  также растет. Но, увеличение переходного сопротивления в месте ОЗЗ приводит к уменьшению тока в поврежденной линии. Поэтому оценка чувствительности защиты общепринятым коэффициентом чувствительности  $K_{\text{ч}} = \frac{3I_{0ПВ}}{I_{\text{СРАБ ЗАЩ}}}$  дает некорректные

результаты, так как показывает лишь уровень превышения тока в поврежденной линии над током срабатывания защиты. Более точно чувствительность можно оценить величиной переходного сопротивления в месте замыкания, при котором защита ещё может «чувствовать» ОЗЗ. Методика оценки чувствительности подробно рассмотрена в [3,4].

Направление токов в поврежденной и неповрежденной цепи остается практически противоположным, что при использовании направленных защит позволит обеспечивать

требуемую чувствительность защиты, ограничиваемую величиной тока небаланса, протекающего через реле в нормальном эксплуатационном режиме.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Величина переходного сопротивления в месте замыкания на землю весьма существенно влияет на чувствительность защит, связанных с обнаружением ОЗЗ, поэтому при разработке и настройке защит от ОЗЗ необходимо учитывать величины переходных сопротивлений в месте замыканий на землю, характерные для региона расположения сети.
2. Находящиеся в настоящее время в эксплуатации системы сигнализации о возникновении ОЗЗ реагируют на величину напряжения на нейтрали. При оснащении нейтрали сети резисторами понижается чувствительность защит от ОЗЗ, основанных на регистрации напряжения нейтрали. Поэтому более предпочтительными являются защиты, реагирующие на токи нулевой последовательности.
3. Так как с увеличением величины переходного сопротивления в месте ОЗЗ растет отношение токов в поврежденной и неповрежденных линиях, оценка чувствительности защиты общепринятым коэффициентом чувствительности дает некорректные результаты. Более грамотно оценивать чувствительность защит от ОЗЗ величиной переходного сопротивления в месте замыкания, на которое реагирует защита.
4. Селективность защиты для повышения ее надежности следует определять в наиболее неблагоприятном случае  $R_3=0$ .
5. Резистивное заземление нейтрали позволяет построить простую и эффективную защиту от ОЗЗ, реагирующую на стационарные токи, отвечающую всем требованиям чувствительности и селективности.

- 
1. *Виштитбеев А.В., Кадомская К.П.* О резистивном заземлении нейтрали в сетях 6-35 кВ // Энергетик, № 3, 2001.– С. 33-34.
  2. *Alexey V. Wishtibeev, Kira P. Kadomskaja.* The Resistivity Grounding of Neutral in 6-35 kV Electrical Networks. Conference Proceeding First International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering Ch. Juvarli TPE-2002. 23-25 April 2002, Baku, Azerbaijan. P. 147-151
  3. *Alexey V. Wishtibeev.* Method of an Estimation of Protection Sensitivity Against the Single-Phase Connections in Overhaed Networks. Conference Proceeding First International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering Ch. Juvarli TPE-2002. 23-25 April 2002, Baku, Azerbaijan. P. 131-133.
  4. *Виштитбеев А.В.* Методика оценки чувствительности защит от однофазных замыканий на землю в воздушных сетях // Электро, № 6, 2002.– С. 34-35.

## **HAVA XƏTLƏRİNDƏ YERLƏ BİRFAZLI QAPANMA STASİONAR REJİMİNİN PARAMETRLƏRİNİN KEÇİD MÜQAVİMƏTLƏRİNİN QIYMƏTİNDƏN ASILILIĞI**

**VIŞTİBEEV A.V.**

Məqalədə 35kV-luq hava xətlərində yerlə birfazlı qapanma nöqtəsində ( $R_z$ ) keçid müqavimətinin rejim parametrlərinə təsirinə baxılmışdır. Müəyyən edilmişdir ki,  $R_z$  yerlə birfazlı qapanmadan mühafizələrin həssaslığına yəhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərir.

# **THE DEPENDENCE OF THE MODE PARAMETERS OF TRANSIENT RESISTANCE VALUES AT THE POINT OF THE GROUND FAULT IN THE AIR LINES**

**WISHTIBEEV A.V.**

The paper the influence of transient resistance values at the point of the ground fault on the mode parameters is considers. An algorithm to calculate a ground fault mode has been developed, with the any methods of the neutral grounding and duplicate lines considered. When working and tuning the protections against ground fault in networks with neutral grounding by a means of resistor it is necessary to take into account the transient resistance values typical for region network situation. It is shown that while grounding the neutral via a resistor it is a reduction of the sensitivity of the protections against ground fault based on the neutral voltage registration. Therefore, more preferable the protections are reacting on the currents of zero sequence as well as relay protection sensitivity factor based on the optimal transient resistance values.