

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА ТОКИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-10 кВ

М.А. Авербух

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Белгород, Россия
avers45@rambler.ru

Д.А. Прасол

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Белгород, Россия
dapras@mail.ru

Подавляющее большинство повреждений в сетях среднего напряжения приходится на однофазные замыкания на землю. При оценке параметров переходных процессов однофазных замыканий обычно не учитывается влияние высших гармонических составляющих. В то же время в системах электроснабжения получают все более широкое распространение потребители с нелинейными вольтамперными характеристиками, что влияет на рост доли высших гармонических составляющих в токах однофазных замыканий. Высокое содержание высших гармонических составляющих имеют токи и напряжения в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью промышленных предприятий, особенно рудодобывающих предприятий. В системах электроснабжения рудников присутствуют мощные нелинейные нагрузки: центральные подземные подстанции, подъемные установки, компрессоры, вентиляторы проветривания и т.п. Оценка влияния высших гармоник на токи однофазного замыкания на землю производится на основании результатов экспериментальных исследований, проведенных в системе электроснабжения действующего рудодобывающего предприятия. Основными источниками высших гармоник в исследуемой схеме являются тиристорные электроприводы постоянного тока подъемных установок, выполненные по системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением. Однако не всегда выполняется учет токов высших гармоник при определении уставок защит однофазных замыканий на землю. Токи высших гармонических составляющих могут увеличивать токи однофазного замыкания на землю в несколько раз. Это может приводить к утяжеленным режимам работы или аварийным ситуациям. Поэтому оценка влияния высших гармоник на токи однофазных замыканий на землю является важной и актуальной задачей. В работе предложен вариант аналитического расчета токов однофазного замыкания на землю с учетом высших гармонических составляющих токов кратных трем. Кроме этого, на величину тока замыкания оказывает влияние режим работы электрической системы и контур протекания тока.

Ключевые слова: высшие гармонические составляющие токов, мощные нелинейные электроприемники, сеть с изолированной нейтралью, токи однофазного замыкания на землю.

Для цитирования: Авербух М.А., Прасол Д.А. Оценка влияния высших гармоник на токи однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжением 6-10 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2. С. 26-40. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_26

ASSESSMENT OF INFLUENCE OF HIGHER HARMONICS ON SINGLE-PHASE EARTH FAULT CURRENTS IN 6-10 kV NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL

M.A. Averbukh

Belgorod State Technological University after V.G. Shukhov
Belgorod, Russia
avers45@rambler.ru

D.A. Prasol

Belgorod State Technological University after V.G. Shukhov
Belgorod, Russia
dapras@mail.ru

Abstract. The vast majority of faults in medium voltage networks are caused by single-phase earth faults. When evaluating the parameters of transient processes of single-phase closures, the influence of higher harmonic components is usually not taken into account. At the same time, consumers with nonlinear volt-ampere characteristics are becoming more and more widespread in power supply systems, which affects the increase in the proportion of higher harmonic components in single-phase circuit currents. The currents and voltages in 6-10 kV networks with isolated neutral of industrial enterprises, especially mining enterprises, have a high content of higher harmonic components. The power supply systems of mines contain powerful non-linear loads, such as central underground substations, hoisting installations, compressors, ventilation fans, etc. The assessment of the influence of higher harmonics on single-phase earth fault currents is based on the results of experimental studies carried out in the power supply system of an operating ore mining enterprise. The main sources of higher harmonics in the investigated circuit are thyristor DC electric drives of hoisting installations, made according to the system thyristor converter – DC motor with independent excitation. However, the consideration of the higher harmonic currents is not always carried out when determining the settings for the protection of single-phase earth faults. The currents of higher harmonic components can increase the single-phase earth fault currents several times. This can lead to heavy duty or emergency situations. Therefore, the assessment of the influence of higher harmonics on the currents of single-phase earth faults is an important and urgent task. The paper proposes a variant of the analytical calculation of single-phase earth fault currents, taking into account

the higher harmonic components of currents multiples of three. In addition, the magnitude of the fault current is influenced by the operating mode of the electrical system and the current flow circuit.

Keywords: higher harmonic components of currents, network with isolated neutral, powerful non-linear electrical receivers, single-phase earth fault currents.

For citation: M.A. Averbukh and D.A. Prasol, “Assessment of influence of higher harmonics on single-phase earth fault currents in 6-10 kV networks with isolated neutral”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 26-40, 2021.
DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_26

I. Введение

В настоящее время сети среднего напряжения 6-10 кВ с изолированной нейтралью широко используются в системах электроснабжения промышленных предприятий и объектов. Одной из проблем таких сетей является наличие токов утечки и однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). В процессе внедрения в промышленные сети 6-10 кВ мощных электроприемников, таких как полупроводниковые преобразователи, регулируемые электроприводы, дуговые сталеплавильные печи, печи сопротивления, сварочные цеха, происходит значительный рост нелинейных нагрузок. Это в свою очередь приводит к генерированию в сеть высших гармоник (ВГ). Если влияние высших гармоник на качество электроэнергии, потери мощности в сетях достаточно хорошо изучены [1, 2], то влияние ВГ на токи утечки и на токи ОЗЗ, и соответственно на работу защит, требует дополнительного изучения. ОЗЗ – вид повреждений, преобладающий в сетях среднего напряжения, который составляет 70-90 % от общего числа повреждений [3-6]. Зачастую именно ОЗЗ становятся первопричиной серьезных аварий, многофазных коротких замыканий. В настоящее время не все методики расчета этих токов учитывают влияние токов ВГ, несмотря на постоянный рост числа нелинейных электроприемников в сетях с изолированной нейтралью.

II. Характеристика объекта исследования

Исследование состава высших гармонических составляющих тока ОЗЗ проводится на примере фрагмента электрической сети рудодобывающего предприятия (рис. 1). К наиболее энергоемким потребителям электрической энергии рудника относятся следующие объекты: центральные подземные подстанции, скиповая и клетевая подъемные установки, компрессоры, вентиляторы проветривания.

На фрагменте схемы электроснабжения представлены только две секции (К1.1 и К1.3) распределительного устройства 6 кВ главной понижающей подстанции рудника, образующих гальванически связанную цепь для протекания токов утечки и ОЗЗ.

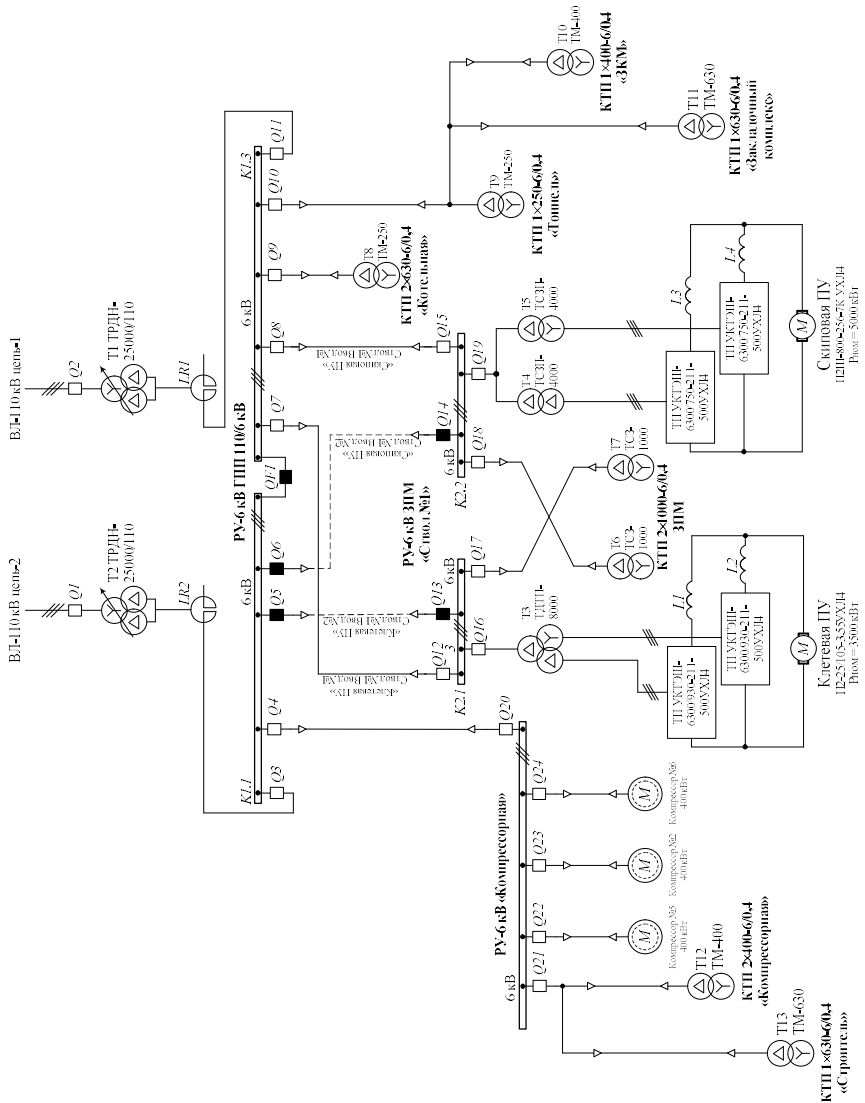


Рис. 1. Фрагмент однолинейной схемы электроснабжения рудника
 Fig. 1. A fragment of a single-line scheme of the mine's power supply

В нормальном режиме секции К1.1 и К1.3 работают отдельно, секционный выключатель $QF1$ отключен. В аварийном режиме, при отключении, например, одного из трансформаторов, секционный выключатель $QF1$ включается и секции работают совместно.

Основной особенностью фрагмента схемы на рис. 1 является наличие электроприводов постоянного тока скиповой и клетевой подъемных установок, которые представляют собой мощную нелинейную нагрузку.

Параметры основных элементов схемы электроснабжения представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1.
Параметры кабельных линий

Table 1.
Parameters of cable lines

Кабельные линии 6 кВ				
Марка кабеля/участок	L , км	$r_{уд}$, Ом/км	$x_{уд}$, Ом/км	$b_{уд}$, мкСм/км
ААБлГ 3×150/ГПП–РУ-6 кВ ЗПМ КПУ	0,45	0,206	0,074	288
ААБлГ 3×150/ГПП–РУ-6 кВ ЗПМ СПУ	0,45	0,206	0,074	288
ААБлГ 3×120/РУ-6 кВ ЗПМ – КТП ЗПМ №1	0,05	0,258	0,076	146
ААБлГ 3×120/РУ-6 кВ ЗПМ – КТП ЗПМ №2	0,05	0,258	0,076	146
ААБлГ 3×150/ГПП–РУ-6 кВ «Компрессорная»	2,50	0,206	0,074	288
ААБлГ 3×120/РУ-6 кВ ЗПМ – КТП «Котельная»	0,15	0,258	0,076	146
ААБлГ 3×150/ГПП – КТП «Тоннель»	5,00	0,206	0,074	288
ААБлГ 3×120/КТП «Тоннель» – КТП «Закладочный комплекс»	3,00	0,258	0,076	146
ААБлГ 3×120/КТП «Тоннель» – КТП «ЗКМ»	2,00	0,258	0,076	146
АПВВНГ 3×95/ РУ-6 кВ «Компрессорная» – Компрессор №5	0,185	0,046	0,035	-
АПВВНГ 3×95/ РУ-6 кВ «Компрессорная» – Компрессор №2	0,185	0,046	0,035	-
АПВВНГ 3×95/ РУ-6 кВ «Компрессорная» – Компрессор №6	0,185	0,046	0,035	-
ААБлГ 3×120/ РУ-6 кВ «Компрессорная» – КТП «Строитель»	2,50	0,258	0,076	146
ААБлГ 3×120/ РУ-6 кВ «Компрессорная» – КТП «Компрессорная»	1,50	0,258	0,076	146

Таблица 2.
 Параметры трансформаторов и синхронных двигателей

Table 2.
 Parameters of transformers and synchronous motors

Трансформаторы							
Тип	$S_{\text{ном}}$, кВА	$U_{\text{ном}}$, кВ		$\Delta P_{\text{хх}}$, кВт	$\Delta P_{\text{кз}}$, кВт	$i_{\text{кз}}$, %	$i_{\text{хх}}$, %
		ВН	НН				
ТРДН-25000/110	25000	115	6,3-6,3	27	120	10,5	0,7
ТСЗП-4000	4000	6,0	0,825	6,4	25	7,4	1
ГДТП-8000/10 У2	8000	6,0	1,05- 1,05 (0,9-0,9)	6,3	53,3	6,0	0,145
ТМ-250	250	6,0	0,4	0,65	3,35	4,0	2,0
ТМ-400	400	6,0	0,4	0,93	4,6	4,0	1,9
ТМ-630	630	6,0	0,4	1,3	6,5	4,0	1,7
ТСЗ-1000/10	1000	6,0	0,4	3,0	11,2	5,5	1,5
Синхронные двигатели							
Тип	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, кВ	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\cos\phi_{\text{ном}}$	η , %		
СДН14-36-12У3	400	6	500	0,9	92,4		

III. Результаты исследования

Оценка высших гармонических составляющих токов в сети 6 кВ рудодобывающего предприятия выполнена на основании результатов экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования проводились в действующей системе электроснабжения рудника, измерения параметров выполнялись во вводных цепях РУ-6 кВ ЗПМ [7, 8]. Фрагменты результатов измерений параметров и показателей высших гармонических составляющих по току во вводных цепях скиповой и клетевой ПУ приведены в табл. 3. На рис. 2 представлены спектры гармоник тока в сети 6 кВ рудодобывающего предприятия при работе скиповой и клетевой ПУ.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что наиболее выраженными являются канонические 11, 13, 23, 25, 35 и 37-я гармоники токов, поскольку тиристорные преобразователи выполнены по 12-пульсной схеме выпрямления. Однако, в сети также присутствуют высшие гармонические составляющие токов кратные трем, что определяет их влияние на токи ОЗЗ.

Значение тока искажения, создаваемого высшими гармониками, кратными трем до 40-й гармоники, определяются по выражению:

$$I_{И.н=3} = \sqrt{\sum_{i=1}^{3n} I_i^2} = \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + I_{21}^2 + I_{27}^2 + I_{33}^2 + I_{39}^2}. \quad (1)$$

Таблица 3.
Величины коэффициентов гармонических составляющих по току

Table 3.
The values of the coefficients of harmonic current components

Скиповая ПУ									
$I(1), A$	$K_I, \%$	$K_{I(3)}, \%$	$K_{I(5)}, \%$	$K_{I(7)}, \%$	$K_{I(9)}, \%$	$K_{I(11)}, \%$	$K_{I(13)}, \%$	$K_{I(15)}, \%$	$K_{I(21)}, \%$
425,80	8,0	0,9	0,4	0,4	0,7	5,7	4,1	0,6	0,5
	$K_{I(23)}, \%$	$K_{I(25)}, \%$	$K_{I(27)}, \%$	$K_{I(29)}, \%$	$K_{I(31)}, \%$	$K_{I(33)}, \%$	$K_{I(35)}, \%$	$K_{I(37)}, \%$	$K_{I(39)}, \%$
	2,0	1,9	0,5	0	0,1	0,30	0,80	1,0	0,30
Клетевая ПУ									
$I(1), A$	$K_I, \%$	$K_{I(3)}, \%$	$K_{I(5)}, \%$	$K_{I(7)}, \%$	$K_{I(9)}, \%$	$K_{I(11)}, \%$	$K_{I(13)}, \%$	$K_{I(15)}, \%$	$K_{I(21)}, \%$
438,84	9,37	1,32	0,81	0,43	1,85	7,18	2,83	1,35	1,57
	$K_{I(23)}, \%$	$K_{I(25)}, \%$	$K_{I(27)}, \%$	$K_{I(29)}, \%$	$K_{I(31)}, \%$	$K_{I(33)}, \%$	$K_{I(35)}, \%$	$K_{I(37)}, \%$	$K_{I(39)}, \%$
	2,92	1,08	1,12	0,19	0,79	1,25	1,38	0,81	0,89

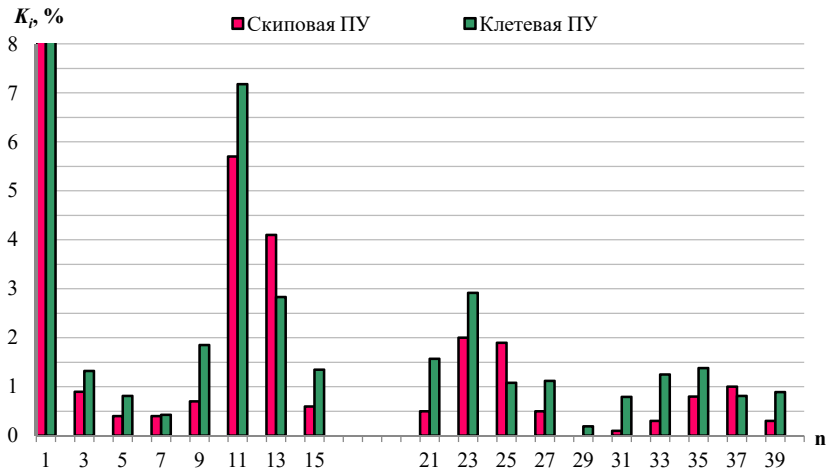


Рис. 2. Спектры гармоник тока на шинах 6 кВ
Fig. 2. Harmonic spectra of current on 6 kV buses

Результаты расчета значений токов высших гармонических составляющих, кратных трем, а также значений токов искажения, создаваемых этими гармониками, приведены в табл. 4.

Таблица 4.
Результаты расчета токов ВГ кратных трем и токов искажения

Table 4.
The results of the calculation of higher harmonic components of currents that are multiples of three and distortion currents

$K_I, \%$	$K_{I(n)}, \%$						
	3	9	15	21	27	33	39
8,0*	0,9	0,7	0,6	0,5	0,12	0,3	0,3
9,37**	1,32	1,85	1,35	1,57	1,12	1,25	0,89
	I_n, A						
$I_{(1)}, A$	3	9	15	21	27	33	39
425,80*	3,832	2,981	2,555	2,129	0,511	1,277	1,277
438,84**	5,793	8,119	5,924	6,890	4,915	5,486	3,906
	$I_{\Sigma, n=3}, A$						
	6,177*						
	15,86**						

Примечание: * – для скиповой ПУ; ** – для клетевой ПУ.

Значение емкостного тока однофазного замыкания на землю I_{oc} определяется как сумма емкостных токов линий электропередачи всей гальванически связанной сети $I_{oc,л}$, электродвигателей напряжением выше 1 кВ, присоединенных к электрической сети, с учетом распределительных устройств, относящихся к данной сети [9, 10]:

$$I_{oc} = \left(\sum_{i=1}^n I_{oc,л} + \sum_{i=1}^m I_{oc,д} \right) \cdot K_{py}, \quad (2)$$

где K_{py} – коэффициент, учитывающий увеличение емкостного тока однофазного замыкания на землю электрической сети за счет емкости оборудования распределительных устройств. Значения K_{py} принимают 1,05-1,1 для воздушных и кабельных линий электрических сетей напряжением 6-10 кВ [9, 10].

Емкостной ток ОЗЗ отдельных электродвигателей определяется по формуле [11]:

$$I_{\text{ос.д}} = 2\sqrt{3} \cdot \pi \cdot f \cdot C_{\text{д}} \cdot U_{\text{ном}}, \quad (3)$$

где $f_{\text{ном}}$ – номинальная частота питающей сети, $f_{\text{ном}} = 50$ Гц; $C_{\text{д}}$ – емкость одной фазы статора двигателя, принимая по данным завода-изготовителя или согласно [11] для синхронных двигателей.

Для ориентировочных расчетов при отсутствии сведений завода-изготовителя допускается использовать выражение для определения параметра $C_{\text{д}}$ для электродвигателей [11]:

$$C_{\text{д}} \approx \frac{13,33 \cdot \sqrt[4]{S_{\text{ном}}^3} \cdot 10^{-6}}{(U_{\text{ном}} + 3600) \cdot \sqrt[3]{n_{\text{ном}}}}, \quad (4)$$

где $S_{\text{ном}}$ – полная номинальная мощность электродвигателя, МВА; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение электродвигателей, В; $n_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения ротора, об/мин.

Расчет емкостного тока однофазного замыкания на землю для кабельных линий может быть рассчитан по формуле [9, 10]:

$$I_{\text{ос.л}} = \frac{U_{\text{ном}} \cdot l}{n}, \quad (5)$$

где n – емкостной коэффициент, $n = 10$, если в электрической сети преобладают кабели сечением выше 70 мм^2 и $n = 6-7$ для всех остальных сечений; l – длина кабельной сети, км.

Расчет емкостных ОЗЗ на землю производится в следующей последовательности:

- 1) составляется расчетная однолинейная схема электроснабжения с учетом максимально возможного количества подключаемого высоковольтного оборудования и при максимальной длине линий электропередач;
- 2) составляется таблица всех элементов, формирующих емкостные токи однофазного замыкания на землю;
- 3) по представленной выше методике производится расчет емкостных токов однофазного замыкания на землю каждого элемента сети;
- 4) суммированием токов гальванически связанных элементов сети определяется максимальный расчетный ток однофазного замыкания на землю.

В табл. 5 представлены значения емкостных токов отдельных элементов сети и суммарных токов замыкания в нормальном и аварийном режимах работы.

Таблица 5.
Результаты расчета емкостных токов
отдельных элементов и суммарных токов ОЗС

Table 5.
The results of the calculation of the capacitive currents
of individual elements and the total currents of single-phase earth faults

Наименование элемента	Тип элемента	Ном. данные	Кол- во	I_{OC} , А	Прим.
Нормальный режим – секция К1.1 РУ-6 кВ ГПП					
Кабельные линии					
ГПП–РУ-6 кВ «Компрессорная»	ААБЛГ 3×150	$L = 2,5$ км	–	1,5	–
РУ-6 кВ «Компрессорная» – Компрессор №5	АПВВНГ 3×95	$L = 0,185$ км	–	0,111	–
РУ-6 кВ «Компрессорная» – Компрессор №2	АПВВНГ 3×95	$L = 0,185$ км	–	0,111	–
РУ-6 кВ «Компрессорная» – Компрессор №6	АПВВНГ 3×95	$L = 0,185$ км	–	0,111	–
РУ-6 кВ «Компрессорная» – КТП «Строитель»	ААБЛГ 3×120	$L = 2,5$ км	–	1,5	–
РУ-6 кВ «Компрессорная» – КТП «Компрессорная»	ААБЛГ 3×120	$L = 1,5$ км	–	0,9	–
Синхронные двигатели					
Компрессор №5, №2, № 6	СДН14-36-12У3	$P_{ном} = 400$ кВт	3	0,0025	$C = 0,25$ пФ
$I_{OC_K1.1} = (4,233 + 0,0025) \cdot 1,1 = 4,659$ А					
Нормальный режим – секция К1.3 РУ-6 кВ ГПП					
Кабельные линии					
ГПП–РУ-6 кВ ЗПМ КПУ	ААБЛГ 3×150	$L = 0,45$ км	–	0,27	–
ГПП–РУ-6 кВ ЗПМ СПУ	ААБЛГ 3×150	$L = 0,45$ км	–	0,27	–
РУ-6 кВ ЗПМ – КТП «Котельная»	ААБЛГ 3×120	$L = 0,15$ км	–	0,09	–
РУ-6 кВ ЗПМ – КТП ЗПМ №1	ААБЛГ 3×120	$L = 0,05$ км	–	0,03	–
РУ-6 кВ ЗПМ – КТП ЗПМ №2	ААБЛГ 3×120	$L = 0,05$ км	–	0,03	–
ГПП – КТП «Тоннель»	ААБЛГ 3×150	$L = 5,00$ км	–	3	–

Продолжение табл. 5
Table 5 (continued)

Наименование элемента	Тип элемента	Ном. данные	Кол-во	I_{OC} , А	Прим.
КТП «Тоннель» – КТП «Закладочный комплекс»	ААБЛГ 3×120	$L = 3,00$ км	–	1,8	–
КТП «Тоннель» – КТП «ЗКМ»	ААБЛГ 3×120	$L = 2,00$ км	–	1,2	–
$I_{OC_K1.3} = (6,69 + 0,0) \cdot 1,1 = 7,359$ А					
Аварийный режим – секции К1.1 и К1.3 РУ-6 кВ ГПП					
$I_{OC_AB} = I_{OC_K1.1} + I_{OC_K1.3} = 4,659 + 7,359 = 12,018$ А					

Как следует из результатов расчета (табл. 5), максимальный ток однофазного замыкания, который может быть принят за расчетный, составляет $I_{OC} = 12,02$ А.

Учет высших гармоник кратных трем осуществляется по формуле:

$$I_{Ci} = \sqrt{I_{OC}^2 + I_{и,n=3}^2}, \quad (6)$$

где $I_{и,n=3}$ – суммарный ток искажения гармоник, кратных трем.

Одновременная работа скиповой и клетевой ПУ исключена. Поэтому в сеть 6 кВ возможно генерирование ВГ составляющих токов, кратных трем, только одной подъемной установкой. Результаты расчетов токов ОЗЗ приведены в табл. 6.

Таблица 6.

Результаты расчета токов однофазного замыкания на землю с учетом ВГ составляющих токов, кратных трем

Table 6.

The results of the calculation of single-phase earth fault currents, taking into account the higher harmonic components of currents that are multiples of three

Режим	$I_{OC_K1.1}$, А	$I_{OC_K1.3}$, А	I_{OC_AB} , А	$I_{и^*,n=3}$, А	$I_{и^{**},n=3}$, А	I_{Ci} , А	I_{Ci} / I_{OC}
Нормальный режим № 1: К1.3 + СПУ	–	7,359	–	6,177	–	9,608	1,31
Нормальный режим № 2: К1.3 + КПУ	–	7,359	–	–	15,86	17,484	2,38

Продолжение табл. 6
Table 6 (continued)

Режим	$I_{oc_к1.1},$ А	$I_{oc_к1.3},$ А	$I_{oc_ав},$ А	$I_{и^*,n=3},$ А	$I_{и^{**},n=3},$ А	$I_{сi},$ А	$I_{сi} /$ I_{oc}
Аварийный режим № 1: К1.1 + К1.3 + СПУ	4,659	7,359	12,018	6,177	–	13,512	1,12
Аварийный режим № 2: К1.1 + К1.3 + КПУ	4,659	7,359	12,018	–	15,86	19,899	1,66

Примечание: * – для скиповой ПУ; ** – для клетевой ПУ.

IV. Заключение

В сети среднего напряжения 6 кВ рудника с изолированной нейтралью токи однофазного замыкания на землю составили значения от 4,7 до 7,4 А в нормальном режиме и до 12 А – в аварийном режиме. На величину тока однофазного замыкания на землю, в первую очередь, влияет наличие протяженных кабельных линий 6 кВ, а также мощных высоковольтных электродвигателей, например, синхронных двигателей компрессорных установок. Доказано, что электроприводы подъемных установок, выполненные по системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, являются главными источниками генерации ВГ в высоковольтную рудничную сеть [7, 8].

Определены суммарные токи высших гармонических составляющих, кратных трем, генерируемые электроприводами подъемных установок. Значения токов высших гармонических составляющих, кратных трем, не зависят от режима однофазного замыкания, они одинаковы как в нормальном режиме работы, так и при однофазных замыканиях. Определены максимальные значения токов ОЗЗ при учете высших гармоник, кратных трем, необходимые для определения уставок защит [12, 13]. Максимальные значения токов ОЗЗ с учетом ВГ составляющих токов, кратных трем, составили от 9,6 А и до 19,9 А в различных режимах работы схемы. Токи высших гармонических составляющих, кратных трем, увеличивают токи однофазного замыкания на землю более чем в 2 раза. Поэтому оценка высших гармоник, кратных трем, является важной и актуальной задачей.

В электрических системах, работающих с изолированной нейтралью, спектр ВГ как в токах нулевой последовательности неповрежденных присоединений, так и в токе ОЗЗ определяется спектром ВГ на поврежденной фазе в момент до возникновения повреждения [12-17]. Влияние на уровень гармонических искажений в токе ОЗЗ также оказывают параметры контура протекания тока.

© Авербух М.А., 2021

© Прасол Д.А., 2021

Поступила в редакцию 22.03.2021

Received 22.03.2021

Библиографический список

- [1] Вагин Г.Я., Юртаев С.Н. К вопросу о нормировании несинусоидальности напряжения и ущерба от высших гармоник // Промышленная энергетика. 2017. № 1. С. 43-47.
- [2] Вагин Г.Я., Куликов А.Л. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электрические станции. 2019. № 6 (1055). С. 54-59. DOI: 10.34831/EP.2019.1055.44184.
- [3] Калихман С.А., Злобин Ю.И. Режимы нейтрали и перенапряжения. Чебоксары: Чуваш. ун-т, 1994. – 64 с.
- [4] Щуцкий В.И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
- [5] Шуин В.А. Теория и практическая реализация защит от однофазных замыканий на землю, основанных на использовании переходных процессов, в электрических сетях 3–35 кВ: дис. д-ра техн. наук, ВНИИЭ, Москва, 1994. – 523 с.
- [6] Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режимы нейтрали электрических сетей. Киев: Наукова Думка, 1985. – 264 с.
- [7] Авербух М.А., Прасол Д.А., Хворостенко С.В. Экспериментальная оценка параметров режимов в высоковольтных рудничных сетях с мощными нелинейными электроприемниками // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 2. С. 75–84. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-75-84.
- [8] Авербух М.А., Прасол Д.А. Анализ электромагнитной совместимости сети высокого напряжения горнорудного предприятия // Энергетик. 2018. № 2. С. 36–41.
- [9] Дударев Л.Е., Лукьянцев Н.М. К расчету установившихся емкостных токов замыкания на землю в схемах электроснабжения промышленных предприятий // Автоматизация и оптимизация режимов электрических систем и приводов. Донецк: Изд-во ДПИ, 1971. С. 105–108.
- [10] Дударев Л.Е., Запороженко С.И., Лукьянцев Н.М. Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. 1971. № 8. С. 64–66.
- [11] Корогодский В.И., Куженов С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 315 с.
- [12] Кискачи В.М. Селективность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник // Электричество. 1967. № 9. С. 24–29.
- [13] Ширковец А.И. Исследование параметров высших гармоник в токе замыкания на землю и оценка их влияния на гашение однофазной дуги // Релейная защита и автоматизация. 2011. № 4. С. 14–19.
- [14] Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью // Электричество. 1957. № 5. С. 31–36.

- [15] Вайнштейн В.Л. Исследование высших гармоник тока замыкания на землю // Промышленная энергетика. 1986. № 1. С. 39–40.
- [16] Шклярский Я.Э., Брагин А.А., Добуш В.С. Влияние гармонического состава тока и напряжения на мощность искажения // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 4. С. 26–31.
- [17] Винокурова Т.Ю., Добрягина О.А., Шагурина Е.С., Шуин В.А. Применение имитационного моделирования для оценки уровня нестабильности высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ // Вестник ИГЭУ. 2014. Вып. 6. С. 31–38.

References

- [1] G.Ya. Vagin and S.N. Yurtaev, “To the rationing of voltage nonsinusoidality and detriment attributed to higher harmonics”, *Industrial Power Engineering*, no. 1, pp. 43–47, 2017.
- [2] G.Ya. Vagin and A.L. Kulikov “Electricity quality in power supply systems. Analysis of rationing and control methods”, *Electrical Stations*, no. 6 (1055), pp. 54–59, 2019. DOI: 10.34831/EP.2019.1055.44184.
- [3] S.A. Kalikhman and Yu.I. Zlobin, *Rezhimy nejtrali i perenapryazheniya [Neutral and overvoltage modes]*. Cheboksary: Chuvash University, 1994 (in Russian).
- [4] V.I. Shchutsky, V.O. Zhidkov and Yu.N. Il'yin, *Zashchitnoe shuntirovanie odnofaznykh povrezhdenij elektroustanovok [Protective shunting of single-phase faults of electrical installations]*. Moscow: Energoatomizdat, 1986 (in Russian).
- [5] V.A. Shuin, “Teoriya i prakticheskaya realizaciya zashchit ot odnofaznykh zamykanij na zemlyu, osnovannykh na ispol'zovanii perekhodnykh processov, v elektricheskikh setyah 3–35 kV [Theory and practical implementation of protection against single-phase ground faults based on the use of transient processes in electrical networks 3–35 kV]”, D. of Tech. S. dissertation, VNIIE, Moscow, 1994 (in Russian).
- [6] I.M. Sirota, S.N. Kislenco and A.M. Mikhailov, *Rezhimy nejtrali elektricheskikh setej [Neutral modes of electrical networks]*. Kiev: Naukova Dumka, 1985 (in Russian).
- [7] M.A. Averbukh, D.A. Prasol and S.V. Khvorostenko, “Experimental evaluation of mode parameters in high-voltage mine networks with powerful nonlinear electric receivers”, *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, vol. 21, no. 2, pp. 75–84, 2017. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-2-75-84.
- [8] M.A. Averbukh and D.A. Prasol, “Electromagnetic compatibility in the high-voltage network of a mining enterprise”, *Energetik*, no. 2, pp. 36–41, 2018 (in Russian).
- [9] L.E. Dudarev and N.M. Luk'yantsev, “K raschetu ustanovivshihsia emkostnykh tokov zamykaniya na zemlyu v skhemah elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij [To the calculation of the steady-state capacitive earth fault currents in the power supply circuits of industrial enterprises]”, in *Automation and optimization of electrical systems and drives modes*. Donetsk: Publishing house of DPI, pp. 105–108, 1971 (in Russian).
- [10] L.E. Dudarev, S.I. Zaporozhchenko and N.M. Luk'yantsev, “Dugovye zamykaniya na zemlyu v kabel'nykh setyah [Arc earth fault in cable networks]”, *Electrical Stations*, no. 8, pp. 64–66, 1971 (in Russian).

- [11] V.I. Korogodskiy, S.L. Kuzhenov and L.B. Paperno, *Relejnaya zashchita elektrodvigatelej napryazheniem vyshе 1 kV [Relay protection of electric motors with voltage above 1 kV]*. Moscow: Energoatomizdat, 1987 (in Russian).
- [12] V.M. Kiskachi, “Selektivnost' signalizacii замыkanij na zemlyu s ispol'zovaniem vysshih garmonik [Selectivity of signaling earth faults using higher harmonics]”, *Electricity*, no. 9, pp. 24–30, 1967 (in Russian).
- [13] A.I. Shirkovets, “Investigations on the parameters of higher harmonics in ground fault current and evaluation of their influence on the quenching of single phase-to-ground arc”, *Relay Protection and Automation*, no. 4, pp. 14–19, Dec. 2011.
- [14] N.N. Belyakov, “Issledovanie perenapryazhenij pri dugovyh замыkaniyah na zemlyu v setyah 6 i 10 kV s izolirovannoj nejtral'yu [Investigation of overvoltages in arcing faults to the earth in networks of 6 and 10 kV with isolated neutral]”, *Electricity*, no. 5, pp. 31–36, 1957 (in Russian).
- [15] V.L. Vaynshteyn, “Issledovanie vysshih garmonik toka замыkaniya na zemlyu [Investigation of higher harmonics of the earth fault current]”, *Industrial Power Engineering*, no. 1, pp. 39–40, 1986 (in Russian).
- [16] Ya.E. Shklyarskiy, A.A. Bragin and V.S. Dobush, “Effect of current and voltage harmonic spectrum on the distortion power”, *The online edition “Oil and Gas Business”*, no. 4, pp. 26–31, 2012.
- [17] T.Yu. Vinokurova, O.A. Dobryagina, E.S. Shagurina, V.A. Shuin, “Application of simulation to evaluation of higher harmonics instability of single-phase earth fault current in 6–10 kV compensated cable networks”, *Vestnik IGEU*, no. 6, pp. 31–38, 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Авербух Михаил Александрович, доктор технических наук, профессор Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация.

Michael A. Averbukh, D. Sci. (Eng.), professor of the Belgorod State Technological University after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation.

Прасол Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация.

Dmitriy A. Prasol, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Belgorod State Technological University after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation.