

*Посохов Н.О.*

*Научный руководитель: Авербух М.А., д-р техн. наук, проф.  
Россия, Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова*

## **ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ ПРИ МОЩНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКЕ НА ТОКИ УТЕЧКИ**

*1. Актуальность проблемы воздействия высших гармоник на ток утечки и токи однофазного короткого замыкания.*

Считается, что в идеальной электроэнергетической системе электроэнергия передается при номинальных значениях напряжения и частоты, не меняющихся в течение времени. В реальных условиях на энергосистемах эти условия не всегда выполняются. Отклонения форм кривых тока и напряжения от правильной синусоиды обычно определяют с помощью гармонических составляющих.

На сегодняшний момент широкое распространение получили технологии, принцип работы которых основан на использовании управляемых выпрямителей, что увеличило содержание гармоник тока в сетях. Вместе с тем при создании такого оборудования обычно считается, что напряжение в точке присоединения синусоидально. Это возможно только в случае, если энергетическая система, питающая оборудование имеет малое гармоническое сопротивление. Следовательно, мелкие потребители, подключенные к такой сети, подвергаются дополнительным опасностям, связанным с влиянием гармоник на управляющее оборудование, установленное в их сетях.

Одним из самых распространенных видов короткого замыкания в сети являются однофазные замыкания на землю - ОЗЗ (75-90% составляют от общего числа электрических повреждений). ОЗЗ довольно часто способствуют развитию крупных аварий, которые сопровождающиеся значительными ущербами и потерями. Замыкание фазы на землю в сетях напряжения 6-35 кВ приводят к следующим неприятным последствиям.

В сети могут появиться перенапряжения порядка 2,4 – 3,5 кратных в сравнении с фазным, что приводит к пробое изоляции неповреждённых фаз и развитию ОЗЗ в «двухместное» или двойное замыканий на землю по своим характеристикам близкое к двухфазным коротким замыканиям (КЗ). Возникновение таких двойных замыканий заметно выросло в настоящее время из-за старения изоляции

электрических машин и аппаратов многих электроэнергетических объектов и нехваткой средств на их модернизацию и ремонт.

Возможно появление феррорезонанса, от которого в данных сетях чаще всего повреждаются трансформаторы напряжения. Иногда выходят из строя и слабо нагруженные силовые трансформаторы, работающие в режиме, близком к холостому ходу. На воздушных ЛЭП ОЗЗ часто возникает при обрыве провода и соприкосновении его с землей. При этом повышается опасность поражения людей и животных электрическим током. Особенно часто такая опасность возникает, если ЛЭП проложена в густонаселённых районах, например, в городе. Такие случаи известны на Российском Севере.

## *2. Обзор подтверждения проблемы.*

Несомненно, главным достоинством сетей с изолированной (компенсированной) нейтралью является возможность работы потребителя электрической энергии без отключения в течение времени необходимого для обнаружения и ликвидации замыкания. В то же время существует опасность поражения персонала и гражданского населения током в месте ОЗЗ (шаговое напряжения) и вероятность перехода ОЗЗ в многофазные короткие замыкания.

Одним из вариантов исполнения защит от ОЗЗ, использующих значения величин нулевой последовательности установившегося режима является организация защит на токах высших гармоник тока  $3I_0$  и напряжения  $3U_0$ .

Несинусоидальные режимы характеризуются наличием различных гармонических составляющих – высших гармоник, субгармоник и интергармоник.

Интергармоники – это гармонические колебания с частотами, не кратными частоте питающей сети. Сегодня в мире отсутствуют единые подходы к вопросам стандартизации интергармоник (ИГ). ИГ являются причиной дополнительного нагрева электрооборудования и, это в свою очередь ведет к сокращению срока службы его изоляции; приводят к дополнительным потерям активной электроэнергии; вызывают колебания и искажение синусоидальной формы питающего напряжения. Уровень интергармонических составляющих напряжения электропитания возрастает из-за применения в электроэнергетических установках частотных преобразователей и другого управляющего оборудования.

Статистические данные по уровням ВГ в городских распределительных сетях 6–10 кВ приводит в своей диссертации А.А. Кузьмин [4]. Автор указывает, что в 45% случаев в сетях исследуемых объектов были обнаружены превышения уровней ВГ, что усугубляет

процессы при дуговых ОЗЗ, в то же время в сетях 35 кВ городского назначения таких превышений автор не обнаружил [4].

Высшие гармоники могут стать причиной опасных перенапряжений в режиме ОЗЗ при выполнении условий резонанса. В своей диссертации А.А. Кузьмин моделирует ОЗЗ с резонансом на 5 гармонике, в результате чего было зафиксировано перенапряжение кратностью 2,25 о.е. от максимального рабочего напряжения [4].

Предельный максимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ в работе [5] предложено оценивать по предельно допустимым значениям коэффициентов  $n$ -ной гармонической составляющей. Руководствуясь аналогичными соображениями, авторы статьи [6] приняли допустимые значения согласно ГОСТ для 5, 7, 11 и 13 гармоник и получили наибольший уровень гармоник рабочего диапазона для моделирования защит [6]

### *3. Пример переменной нагрузки*

На существующих промышленных предприятиях нашей страны к общей шине цеховых систем электроснабжения присоединено большое количество электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Так это может быть регулируемый электропривод динамических нагнетателей, металлорежущих станков, крановых механизмов. Из-за того, что электроприемники с нелинейными вольтамперными характеристиками могут нормально функционировать при разнообразных режимах, так например для крановых механизмов характерной особенностью оказывается резкопеременный режим работы, вызванный возможностью одновременной работы трех основных механизмов крана: подъем – спуск груза, перемещение тали и перемещение крана. Это обстоятельство привело к тому, что преобладают переходные режимы, составляющие до 60 % одного цикла работы таких механизмов. Так как в основе регулируемого электропривода положен принцип преобразования электроэнергии, за счет применения статических преобразователей, то такие установки являются электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками, а значит причиной генерации высших гармоник тока и напряжения в питающую систему электроснабжения.

Возникновение гармоник напряжения, кратных основной частоте, возникающих при работе преобразователя частоты, может вызвать срабатывание защиты от утечек. Чем выше частота переключения линейного напряжения, тем меньше емкостное сопротивление и больше емкостная составляющая тока утечки.

Так как трехфазная система является симметричной, то только дисбаланс каждой гармоники вносит вклад в нейтральный ток. В трехфазной системе гармоники трехкратные и синфазные и их сумма во времени является индивидуальной величиной, зависящей от способа переключения силовых ключей.

#### 4. Расчет однофазного короткого замыкания на землю.

Значение емкостного тока однофазного замыкания на землю  $I_{oc}$  представляется как сумма емкостных токов линий электропередачи всей электрически связанной сети  $I_{oc.л}$ , электродвигателей напряжением выше 1 кВ, питающихся от этой электрической сети, с учетом распределительных устройств, которые относятся к данной сети [2]:

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

где  $K_{py}$  – коэффициент, учитывающий увеличение емкостного тока однофазного замыкания на землю электрической сети за счет емкости оборудования распределительных устройств. Значения  $K_{py}$  принимают согласно [219]:

$K_{py} = 1,05 - 1,1$  для воздушных и кабельных линий электрических сетей напряжением 6-10 кВ;

$K_{py} = 1,12 - 1,15$  для воздушных сетей напряжением 35 кВ;

$K_{py} = 1$  – для кабельных электрических сетей напряжением 35 кВ.

Емкостной ток отдельных электродвигателей рассчитывается по формуле [3]:

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

где  $f_{ном}$  – номинальная частота питающей сети,  $f_{ном} = 50$  Гц;

$C_d$  – емкость одной фазы статора двигателя, принимая по данным завода-изготовителя или согласно [3] для синхронных двигателей, [2] – для асинхронных двигателей.

Для ориентировочных расчетов при отсутствии сведений завода изготовителя допускается использовать следующие соотношения [3]:

– для неавнолюсных электродвигателей с короткозамкнутым ротором

$$C_d \approx \frac{0,013 \cdot S_{ном} \cdot 10^{-6}}{\sqrt{U_{ном}(1 + 0,08U_{ном})}}, \quad (3)$$

где  $S_{ном}$  – полная номинальная мощность электродвигателя, МВ·А;

$U_{ном}$  – номинальное напряжение электродвигателей, кВ;

– для остальных электродвигателей определяется по формуле:

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

где  $n_{НОМ}$  – номинальная частота вращения ротора, об/мин.

Собственный емкостной ток однофазного замыкания на землю отдельной кабельной линии электропередачи, состоящей из  $m$  проводов (кабелей) в каждой фазе, рассчитывается по формуле [3]:

$$I_{ОСЛ} = I_{ОС} \cdot L \cdot m, \text{ A} \quad (5)$$

где  $I_{ОС}$  – значение собственного емкостного тока единицы длины одноцепной воздушной линии определяется по формуле:

$$I_{ОС.ОДН} = I'_{ОС} \cdot l, \quad (6)$$

где  $I'_{ОС}$  – значение собственного емкостного тока единицы длины одноцепной воздушной линии принимается по табл. 6.7 [2]. Емкостной ток двухцепной линии может быть рассчитан по формуле [2]:

$$I_{ОС.ДВ} = (1,6 \div 1,3) \cdot I_{ОС.ОДН} \quad (7)$$

Предварительный расчет емкостного тока однофазного замыкания на землю для кабельных и воздушных линий может быть определен по упрощенным формулам:

$$I_{ОСЛ} = \frac{U_{НОМ} \cdot l}{n}, \quad (8)$$

где  $n$  – емкостной коэффициент,  $n = 10$ , если в электрической сети преобладают кабели сечением выше  $70 \text{ мм}^2$  и  $n = 6-7$  для всех остальных сечений;

$l$  – длина кабельной сети, км;

$$I_{ОС.В} = K \cdot U_{НОМ} \cdot l \cdot 10^{-3}, \quad (9)$$

где  $I_{ОС.В}$  – емкостной ток замыкания на землю воздушной линии, А;

$l$  – длина линии, км;

$K$  – емкостной коэффициент,  $K = 2,7$  для линий 6 – 10 кВ,  $K = 3,3$  – для линий 35 кВ на деревянных опорах с тросами;  $K = 3,0$  – для линий 35 кВ на металлических опорах с тросами [2].

В случаях, когда конструктивное выполнение воздушной электрической сети не определено, значение  $I_{ОС}$  с запасом, учитывающим емкость присоединяемых к электрической сети распределительных устройств, может быть найдено по формуле [2]:

$$I_{ОС} = \frac{0,0044 \cdot l \cdot U_{НОМ}}{\sqrt{3}}. \quad (10)$$

Расчет емкостных токов однофазного замыкания на землю рассчитывается в следующей последовательности:

- составляется расчетная однолинейная схема электроснабжения предприятия с учетом максимально возможного количества подключаемого высоковольтного оборудования и при максимальной длине линий электропередач;

- составляется таблица всех элементов формирующих емкостные токи однофазного замыкания на землю;

- по вышеуказанным формулам производится расчет емкостных токов однофазного замыкания на землю каждого элемента сети;

- суммированием токов гальванически связанных элементов сети определяется максимальный расчетный ток однофазного замыкания на землю.

Реализация последовательности расчета произведена для газопромислов и карьеров Норильского промышленного района. В качестве примера представлен расчет емкостных токов однофазного замыкания на землю в сети, питающей рудник открытых работ «Медвежий ручей» (рис. 1).[7]

В табл. 1, 2 представлены значения емкостных токов отдельных элементов сети и суммарный ток замыкания. Как следует из табл. 2, максимальный ток однофазного замыкания, принимаемый за расчетный, равен  $I_{OC} = 5 A$ .

Таблица 1

Значения емкостных токов отдельных элементов сети

Тип двигателя	Полная мощность, МВ·А	Емкость фазы двигателя, мкФ	Емкостной ток двигателя, А	Примечание
АКН -2-16-69	1,563	0,008	0,027	Вентилятор ВЦД-32М
АКН-2-16-39	0,667	0,003	0,011	Подъемная машина
СДС-15-64-6	2,778	0,1415	0,462	Подъемная машина
СДЭ-2-15-34-6	0,7	0,0503	0,164	ЭКГ-8И
СДС-12-56-6	0,356	0,033	0,109	Вентилятор

Значения емкостных токов однофазного замыкания на землю в сетях напряжением 35 кВ рассчитываются аналогично. С этой целью также составляется расчетная схема. Значительное влияние на

емкостной ток однофазного замыкания на землю оказывают воздушные линии, отходящие от ТЭЦ-1.[7]

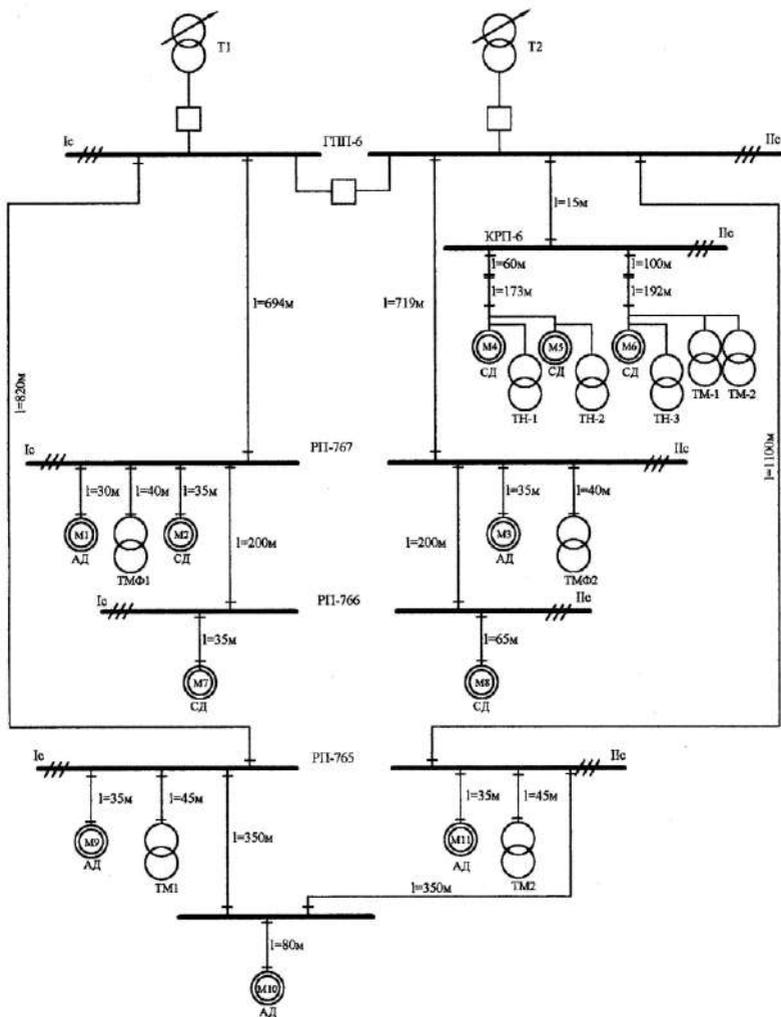


Рисунок 1. Расчетная схема для определения токов однофазного замыкания в сетях с изолированной нейтралью напряжением 6 кВ

Таблица 2

Суммарный ток замыкания

Наименование элемента	Тип элемента	Номинальные данные	Кол-во	Значение $I_{ос}, A$	Примечание
Нормальный режим - I с. ГПП-6 – РП-767					
Кабельные линии	ААБГ (3x150)	L = 160 м	-	0,096	
	ААБГ (3x50)	L = 30 м	-	0,03	
	ААБГ (3x50)	L = 40 м	-	0,04	
	ААБГ (3x50)	L = 35 м	-	0,035	
	Воздушная линия АС (3x240)	L = 534 м	-	0,081	
Асинхронный двигатель	АКН-2-16-69	$P_H = 1250$ кВт	1	0,027	C = 0,008 мкФ
Трансформатор	ТМФ-400	$S_H = 400$ кВ·А	1	0,06	
Синхронный двигатель	СДС-12-56-6	$P_H = 320$ кВт	1	0,109	C = 0,033 мкФ
РП-767 – РП-766 ГПП-6 – РП-765					
Кабельные линии	ААБГ (3x150)	L = 200 м	-	0,24	
	СБГ (3x95)	L = 35 м	-	0,021	
Синхронный двигатель	СДС-15-64-6	$P_H = 2500$ кВт	1	0,462	C = 0,142 мкФ

Кабельные линии	ААБГ (3x185)	L = 80 м	-	0,048	C = 0,008 мкФ	
	ААБГ (3x70)	L = 35 м	-			
Кабельные линии	ААБГ (3x35)	L = 45 м	-	0,035		
	ААШВ (3x95)	L = 350 м	-	0,045		
Воздушная линия	СБН (3x50)	L = 80 м	1	0,21		
	АС(3x185), АС (3x150)	L = 740 м	1	0,08		
Асинхронный двигатель	АКН-2-16-69	P <sub>H</sub> = 1250 кВт	1	0,113		
Трансформатор Асинхронный двигатель	ТМ-400			0,027		
	АКН-2-16-39	S <sub>H</sub> = 400 кВ·А P <sub>H</sub> = 500 кВт		0,06 0,011		
Трансформатор	ТДН-10000/110/6	S <sub>H</sub> = 10000 кВ·А	1	0,06		
$I_{OC.c} = 1,1 \cdot (1,254 + 0,636) = 2,079 \text{ A}$						
Нормальный режим - II с. ГПП-6 – РП-767						
Кабельные линии	ААБГ (3x150)	L = 179 м	-	0,107	C = 0,008 мкФ	
	ААБГ (3x50)	L = 35 м	-	0,035		
Воздушная линия	ААБГ (3x50)	L = 40 м	-	0,04		
	АС (3x240)	L = 540 м	1	0,08		
Асинхронный двигатель	АКН-2-16-69	P <sub>H</sub> = 1250 кВт	1	0,08		
Трансформатор	ТМФ-400	S <sub>H</sub> = 400 кВ·А		0,027 0,06		
РП-767 – РП-766 ГПП-6 – РП-765						
Кабельные линии	ААБГ 2(3x150)	L = 200 м	-	0,24		C = 0,142 мкФ
	СБГ (3x95)	L = 65 м	1	0,039		
Синхронный двигатель	СДС-15-64-6	P <sub>H</sub> = 2500 кВт		0,462		

Кабельные линии	ААБГ 2(3x185)	L = 80 м	-	0,048	C = 0,008 мкФ
	ААБГ (3x70)	L = 35 м	-	0,035	
	ААБГ (3x35)	L = 45 м	-	0,045	
	Воздушная линия	АС (3x185) АС (3x150)	L = 1020 м	1 1	
Асинхронный двигатель	АКН-2-16-689	P <sub>H</sub> = 1250 кВт		0,027	C = 0,008 мкФ
Трансформатор	ТМ-400	S <sub>H</sub> = 400 кВ·А		0,06	
ГПП-6 – КРП-6					
Кабельные линии	СБН (3x95) СБГ (3x70)	L = 15 м	-	0,009	C = 0,05 мкФ
		L = 625 м	-	0,096	
		L = 365 м	-	0,056	
Воздушная линия	АС-70	P <sub>H</sub> = 630 кВт	3	0,492	C = 0,05 мкФ
Синхронный двигатель	СДЭ-2-15-34-6	S <sub>H</sub> = 160 кВ·А	3	0,18	
Трансформатор	ТМЭ-160/6	S <sub>H</sub> = 400 кВ·А	2	0,12	
Буровой станок	ПТП				
СБШ-250МН					
Трансформатор	ТДН-10000/35	S <sub>H</sub> = 10000кВА	1	0,06	
Нормальный режим I <sub>OC,nc</sub> = 1,1·(1,465+1,008) = 2,72 А					
Аварийный режим I <sub>AB</sub> = I <sub>OC,lc</sub> +I <sub>OC,nc</sub> = 2,079+2,66 = 4,74 А					

**Выводы.** Экспериментальные данные, полученные на различных электросетевых объектах 6–35 кВ, выявили присутствие ряда гармоник в емкостном токе ОЗЗ. Наиболее выражены нечетные гармоники ряда 3, 5, 7, 11...37 на частотах от 50 Гц до 3,5 кГц, этот ряд гармоник вносит весомый вклад в основу результирующего сигнала, доля которых может быть свыше 50%. Ток в аварийном режиме составил 4,72 А, соответственно при большом количестве высших гармоник уровень тока может увеличиться до 10,5А. Помимо этого имеется вероятность возникновения резонансных явлений (как по току, так и по напряжению) на определенных элементах системы электроснабжения. Исходя из вышеизложенного, можно сделать заключение, что значения гармонических напряжений, даже небольшие, могут привести к существенному значению составляющей тока при ОЗЗ [1].

## Библиографический список

1. Шуин, В. А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ / В. А. Шуин, А. В. Гусенков // — М.: НТФ «Энергопрогресс». Библиотечка электротехника; Вып. 11 (35). 2001. — 104 с.
2. Дударев, Л.Е. К расчету установившихся емкостных токов замыкания на землю в схемах электроснабжения промышленных предприятий / Л.Е. Дударев, Лукьянцев Н.М. // Автоматизация и оптимизация режимов электрических систем и приводов: Сб. науч. тр. – Донецк: Изд. ДПИ, 1971. – С.105-108.
3. Корогодский, В.И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В.И. Корогодский, С.Л. Куженов, Л.Б. Паперно. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 315 с.218 – 219.
4. Кузьмин, А. А. Исследование и разработка устройства предотвращения дуговых перенапряжений при несинусоидальности тока замыкания на землю: дис. канд. техн. наук: 05.14.12 / Кузьмин Алексей Александрович. – Новосибирск: Новосибирский гос. техн. ун-т, 2016. – 164 с.
5. Винокурова, Т. Ю. Методика выбора параметров срабатывания максимальных токовых защит от замыкания на землю на основе высших гармоник в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ / Т. Ю. Винокурова, Е. С. Шагурина, В. А. Шуин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. – № 3. – С. 20-28.
6. Многопараметрические токовые защиты от замыканий на землю кабельных сетей напряжением 6 – 10 кВ / А. Н. Голубев [и др.] // Электрические станции. – 2017. – № 8. – С. 36-45.
7. Авербух, М.А. Системный подход к оценке параметров заземляющих сетей электроустановок северных промышленных комплексов: монография / М.А. Авербух, В.В. Забусов, В.И. Пантелеев; Сибирский федеральный университет, Норильский индустриальный институт. – Красноярск, 2009. – 305с.