

УДК 621.311

## Математическая модель для оценки минимального уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ

Т.Ю. Винокурова, Е.С. Шагурина, В.А. Шуин  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: shuin@rza.ispu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** В распределительных кабельных сетях 6–10 кВ городского и промышленного электро-снабжения, работающих с компенсацией емкостного тока однофазного замыкания на землю, в качестве защиты от данного вида повреждений основное применение получили устройства, основанные на использовании высших гармоник тока нулевой последовательности. Чувствительность существующих и разрабатываемых защит данного типа при внутренних повреждениях зависит от достоверности оценок минимального уровня высших гармоник в токах однофазного замыкания на землю. Известные оценки указанной величины в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ были выполнены в конце 60-х годов на основе приближенных моделей источников высших гармоник с использованием ручных методов расчета или отдельных экспериментов в действующих сетях. Опыт эксплуатации защит на основе высших гармоник не всегда подтверждает указанные оценки. Появление современных систем моделирования, например Matlab с пакетом расширения Simulink, позволяет уточнить эти оценки и на этой основе уточнить требования к чувствительности защит от однофазного замыкания на землю на основе высших гармоник.

**Материалы и методы:** Для оценки минимального уровня высших гармоник в токах однофазного замыкания на землю использовалась обобщенная модель компенсированной кабельной сети 6–10 кВ и составляющих ее элементов в системе Matlab с пакетом расширения Simulink. Обобщенная модель компенсированной кабельной сети 6–10 кВ и параметры ее элементов получены на основе статистического анализа данных по системам электро-снабжения городов и промышленных предприятий.

**Результаты:** Разработаны модель компенсированной сети 6–10 кВ и методика выбора параметров ее элементов на основе оценки минимального уровня высших гармоник в токах однофазного замыкания на землю.

**Выводы:** Результаты вычислительных экспериментов на моделях компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ позволяют уточнить требования к чувствительности защит от однофазного замыкания на землю, основанных на использовании высших гармоник, и повысить эффективность их функционирования.

**Ключевые слова:** распределительные компенсированные кабельные сети 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, высшие гармоники, защита от однофазных замыканий на землю.

## Mathematical model of calculating the minimum level of higher harmonics in line-to-ground fault current in 6-10 kV resonant earthed systems

T.Yu. Vinokurova, E.S. Shagurina, V.A. Shuin  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: shuin@rza.ispu.ru

### Abstract

**Background:** Protective relays based on measurement of higher harmonics of zero-sequence currents are the most common devices for protection against line-to-ground faults in 6–10 kV industrial and urban distribution cable networks with line-to-ground capacitance current compensation. The sensitivity of the existing protective relays and the ones being designed to internal faults depends on the reliability of assessing the higher harmonics minimum level in line-to-ground fault currents. The known calculations of this parameter in 6–10 kV resonant earthed cable networks were conducted either manually or experimentally at the existing power facilities in the late 1960s based on the approximate models of higher harmonics sources. The operating experience of relays based on higher harmonics measurement does not always confirm these calculations. The development of modern simulation systems such as Matlab and Simulink allows us to make these evaluations more precise and, therefore, specify the requirements for relay sensitivity to line-to-ground faults based on higher harmonics measurement.

**Materials and Methods:** The higher harmonics minimum level in line-to-ground currents was calculated on the basis of a generalized model of a 6–10 kV resonant earthed cable network and its constituting parts in the Matlab system extended by Simulink package. The generalized model of a 6–10 kV resonant earthed cable network and parameters of its components were obtained by statistical analysis of industrial and urban electrical networks data.

**Results:** We have developed a generalized model of a 6–10 kV resonant earthed cable network and techniques of choosing parameters of the network elements by calculating the higher harmonics minimum level in line-to-ground fault currents.

**Conclusions:** The results of the computational experiments on the 6–10 kV resonant earthed cable networks allow us to specify the requirements for relay sensitivity to line-to-ground faults by measuring higher harmonics and to increase protection efficiency.

**Key words:** 6–10 kV distribution resonant earthed cable networks, line-to-ground faults, higher harmonics, protection against line-to-ground faults.

**Введение.** В распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения, работающих, как правило, с резонансным заземлением нейтрали через дугогасящий реактор (компенсацией емкостных токов), однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются основным видом повреждений. Поэтому надежность работы таких сетей и электроснабжения потребителей зависит от технического совершенства защиты от ОЗЗ. В компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ в качестве защиты от ОЗЗ основное применение получили устройства, основанные на использовании способов абсолютного и относительного замера высших гармоник (ВГ) в токах нулевой последовательности присоединений защищаемого объекта [1, 2 и др.]. К ним относятся, в частности, токовые устройства защиты абсолютного замера ВГ УСЗ-2/2 индивидуального исполнения и централизованные токовые устройства относительного замера ВГ УСЗ-3М, разработанные во ВНИИЭ и выпускаемые ЧЭАЗ, а также их аналоги, реализованные в виде соответствующих функций защиты от ОЗЗ в некоторых микропроцессорных терминалах РЗА для линий 6–35 кВ. Перспективным представляется также применение направленных устройств защиты, основанных на контроле направления мощности нулевой последовательности ВГ (например, [3]).

Спектр ВГ в напряжениях и, соответственно, в токах ОЗЗ рассматриваемых сетей нестабилен и зависит от состава источников высших гармоник и режимов их работы.

Основными источниками ВГ в сетях 6–10 кВ являются вентильные преобразователи [4], а при их отсутствии в нагрузке потребителей – силовые трансформаторы приемных подстанций 6–10/0,4 кВ [5, 6]. В спектре указанных источников наиболее выражены 5, 7, 11 и 13 гармоники [4, 5]. Для обеспечения устойчивости функционирования в условиях нестабильности спектра ВГ устройства защиты выполняются реагирующими на суммарный уровень (как правило, на среднеквадратичное значение) указанных гармоник. Поэтому при разработке и проектировании защит на основе ВГ для определения требований к их чувствительности по первичному току и области возможного применения возникает необходимость в оценке минимально возможного общего уровня ВГ в токе ОЗЗ для рассматриваемых сетей при различных значениях суммарного емкостного тока  $I_{C\Sigma}$ .

Оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ ранее были даны в работах В.М. Кискачи и И.В. Жежеленко [5, 6]. Указанные оценки проводились в конце 60-х годов на основе упрощенных аналитических методов и моделей кабельных сетей 6–10 кВ и их элементов, огра-

ничивающих возможности исследователей и разработчиков. Опыт эксплуатации не всегда подтверждает сделанные на основе указанных исследований оценки в части чувствительности, а также области возможного применения защит, основанных на использовании ВГ (например, [7]). Поэтому уточнение требований к чувствительности защит от ОЗЗ на основе ВГ представляется актуальной задачей.

Появление современных систем моделирования ЭЭС и электроэнергетических объектов, например системы Matlab с пакетом расширения Simulink, обеспечивает возможность применения более сложных и, соответственно, более точных моделей компенсированных сетей 6–10 кВ для уточнения минимального уровня ВГ в токах ОЗЗ и требований чувствительности защит на их основе.

**Анализ схем замещения компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, применяемых для оценки минимального уровня ВГ в токах ОЗЗ.** Гармонический состав тока в месте ОЗЗ и токов нулевой последовательности  $I_0$  поврежденного и неповрежденного присоединений с достаточной точностью определяется гармоническим составом напряжения поврежденной фазы в месте замыкания на землю [5, 8]. При определении минимального уровня ВГ в фазных напряжениях сети и, соответственно, в токе ОЗЗ в [5] принимается, что ЭДС источника питания имеет синусоидальную форму (коэффициент несинусоидальности  $K_{нс} = 0$ ), и основным источником ВГ является нелинейность кривой намагничивания трансформаторов 6–10/0,4 кВ, установленных на приемных трансформаторных или распределительно-трансформаторных подстанциях (ТП, РТП) кабельных сетей 6–10 кВ промышленного или городского электроснабжения. Такое допущение приемлемо для потребителей предприятий со сменным суточным графиком работы, на которых при ночном спаде нагрузки или в выходные дни все основные технологические установки и, соответственно, основные источники ВГ (прежде всего, вентильные преобразователи), кроме трансформаторов, могут практически полностью отключаться.

В [5] для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ используется схема замещения сети, приведенная на рис. 1, а.

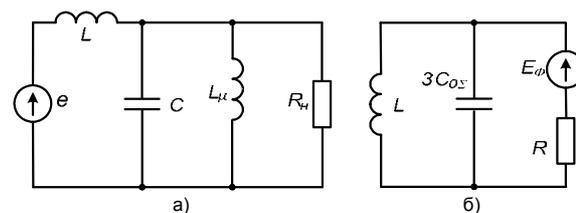


Рис. 1. Расчетные схемы замещения сети 6–10 кВ для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ: а – по [5]; б – по [6]

В схеме замещения по рис. 1,а:  $C = 3C_{0\Sigma}$  – суммарная емкость трех фаз сети на землю;  $e$  – эквивалентная ЭДС источника питания;  $L$  – суммарная индуктивность питающих трансформаторов центра питания (ЦП);  $L_{\mu}$  – суммарная индуктивность ветвей намагничивания подключенных трансформаторов нагрузки всех присоединений;  $R_{\mu}$  – суммарное сопротивление нагрузки трансформаторов. В целях упрощения в расчетной схеме замещения (рис. 1,а) не учитывается влияние на уровень ВГ напряжения в месте ОЗЗ ряда факторов: сопротивлений линий, связывающих ЦП с приемными подстанциями; сопротивления системы; сопротивлений обмоток трансформаторов нагрузки; междуфазных емкостей сети; комплексного характера сопротивления нагрузки; различия токов намагничивания для трансформаторов различной мощности; дугогасящего реактора (ДГР) и др.

На минимальный уровень ВГ, определенный по схеме замещения рис. 1,а, существенное влияние оказывает соотношение мощности питающих и приемных трансформаторов  $S = S_{\text{пум}\Sigma} / S_{\text{пр}\Sigma}$ , которое в [5] принималось равным 1,5 ... 3. Полученное в [5] на основе расчетной схемы замещения по рис. 1,а минимальное значение уровня для одной из наиболее резко выраженных гармоник – 5-й, в основном определяющей чувствительность в рассматриваемых условиях защит на основе ВГ, при значении параметра  $S = 1,5$  составляет ~2,6% от  $I_{c\Sigma}$ . Соответствующие указанной доле значения тока 5-й гармоники для сетей с различными значениями  $I_{c\Sigma}$  приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные значения тока 5-й гармоники  $I_5 = 0,26I_{c\Sigma}$ , соответствующие данным [5]

Ток $I_5$	Значение тока $I_5$ , А			
	$I_{c\Sigma} = 25$ А	$I_{c\Sigma} = 50$ А	$I_{c\Sigma} = 100$ А	$I_{c\Sigma} = 250$ А
В токе ОЗЗ	0,65	1,3	2,6	6,5
В токе $3I_0$ поврежденного присоединения	0,585	1,17	2,34	5,85
Ток срабатывания УСЗ-2/2 [1]	0,95	1,4	2,5	4,85

В [8] показано, что условия селективности и чувствительности максимальных токовых защит абсолютного замера ВГ могут быть обеспечены только на присоединениях с относительно небольшими значениями собственного емкостного тока  $I_{C\text{собс}^*} = I_{C\text{собс}} / I_{c\Sigma} \leq 0,1$ . При значениях  $I_{C\text{собс}^*} = 0,1$  ток 5-й гармоники  $I_5$  в поврежденном присоединении будет равен 0,9 от значения  $I_5$  в месте ОЗЗ (табл. 1). Для сравнения с током 5-й гармоники в поврежденном присоединении с  $I_{C\text{собс}^*} = 0,1$  в табл. 1 приведены также значения тока срабатывания наиболее широко применяемого в компенсированных сетях 6–10 кВ устройства токовой защиты типа УСЗ-2/2 для 5-й гармоники [1, 2]. Анализ данных табл. 1 показывает, что при полученном в [5] минималь-

ном расчетном уровне 5-й гармоники требуемая чувствительность ( $K_{\text{ч.мин}} \geq 1,5$  [8]) защиты типа УСЗ-2/2 не обеспечивается.

В [6] предложен расчетный метод определения ВГ тока ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения. Для расчета  $\nu$ -й гармоники в токе ОЗЗ используется схема замещения, показанная на рис. 1,б. В расчетной схеме замещения рис. 1,б, как и в схеме замещения рис. 1,а, не учитываются ряд факторов, которые могут оказывать существенное влияние на уровень ВГ в токе ОЗЗ, а именно: сопротивление линий, связывающих ЦП с приемными подстанциями; междуфазные емкости; соотношения между емкостями сети по концам линий; сопротивления обмоток и нагрузка трансформаторов, ДГР и др. Для определения эквивалентной ЭДС  $\nu$ -й гармоники  $E_{\nu}$  в [6] используются данные по гармоникам токов намагничивания трансформаторов, полученные еще в 30-е годы [9]. Расчеты, выполненные в [6] по усредненным значениям  $E_{\nu}$  силовых трансформаторов и параметров других элементов расчетной схемы замещения по рис. 1,б дали для сети 6 кВ с  $I_{c\Sigma} = 40$  А при значении параметра  $S = 0,75$  следующие уровни 3, 5 и 7-й гармоник в токе ОЗЗ:  $I_3 \approx 0,1$  А;  $I_5 \approx 0,75$  А;  $I_7 \approx 0,62$  А. Если принять, что при изменении суммарного емкостного тока сети  $I_{c\Sigma}$  процентное соотношение 1-й и высших гармоник не изменяется, то для сети с  $I_{c\Sigma} = 25$  А расчетное значение  $I_5 \approx 0,47$  А, т.е. заметно меньше, чем полученное в [5] (табл. 1).

Расчетные данные, полученные в [5, 6], показывают, что уровень ВГ в токах ОЗЗ может быть небольшим, поэтому погрешности в моделях сети 6–10 кВ и составляющих ее элементов могут привести к неточным выводам при оценке требований к чувствительности защит от ОЗЗ, основанных на использовании высших гармоник, и условий их применимости. Применение современных систем моделирования, например Matlab, позволяет создать более точные модели сетей 6–10 кВ для расчета ВГ в токах ОЗЗ и получить более точные оценки минимального уровня ВГ в токах ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, определяющие требования к защитами от данного вида повреждений на основе ВГ.

**О влиянии точности аппроксимации кривой намагничивания на оценку спектра высших гармоник, генерируемых трансформаторами.** При расчетах ВГ, генерируемых силовыми трансформаторами, в [5] принято, что кривая намагничивания трансформаторов с приемлемой точностью аппроксимируется полиномом 5-й степени:  $i_{\mu} \approx \alpha \psi^5$ .

На рис. 2 для сравнения приведены характеристики намагничивания стали Э330, широко применяемой для выполнения магнитопроводов силовых трансформаторов, и ее аппроксимация полиномом 5-й степени.

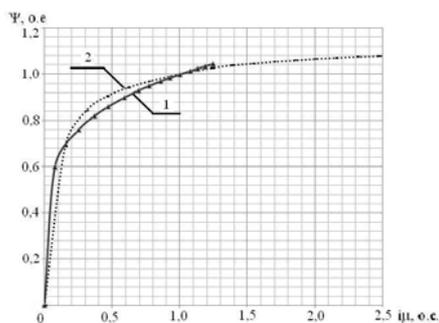


Рис. 2. Кривые намагничивания стали Э330 (в о.е.): 1 – исходная кривая; 2 – аппроксимация полиномом 5-й степени

Анализ полученных данных (рис. 2) показывает, что используемая в [5] аппроксимация кривой намагничивания электротехнических сталей может приводить к заметным погрешностям по сравнению с действительной кривой и, соответственно, к погрешностям в оценке гармоник тока намагничивания. Оценка указанных погрешностей была выполнена с использованием моделей трансформаторов с нелинейным магнитопроводом, выполненных в системе Matlab, в 1-й из которых использовалась реальная кривая намагничивания стали Э330, а во 2-й – ее аппроксимация полиномом 5-й степени. Сравнение результатов моделирования показало, что замена реальной характеристики намагничивания ее аппроксимацией полиномом 5-й степени дает погрешность в оценке уровня 5-й гармоники до 10 % и более, для 7-й гармоники – до 40 % и более (рис. 3).

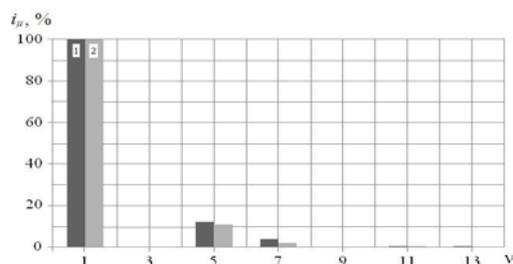


Рис. 3. Спектры тока намагничивания, полученные на моделях трансформаторов в системе Matlab, при  $U = U_{ном}$ : 1 – модель с реальной кривой намагничивания стали Э330; 2 – модель с аппроксимацией кривой намагничивания стали Э330 полиномом 5-й степени

Расчеты на моделях трансформаторов 6–10/0,4 кВ с реальной характеристикой намагничивания для электротехнических сталей Э42 и Э330 показали также, что в среднем отношения среднеквадратичных значений 5-й и 7-й гармоник к полному току намагничивания находятся в пределах:  $I_{5*} = 0,086 – 0,154$ ,  $I_{7*} = 0,024 – 0,053$ . Для сравнения можно отметить, что при оценке минимального уровня ВГ, генерируемых трансформаторами, в [6] указанные соотношения принимались равными  $I_{5*} = 0,22$ ,  $I_{7*} = 0,1$ .

Анализ на моделях показал, что наибольшую точность оценки ВГ, генерируемых трансформаторами, обеспечивает аппрокси-

мация их кривой намагничивания функцией арктангенса  $B = \alpha \cdot \arctg(\beta H) + \gamma \cdot H^m$  (рис. 4).

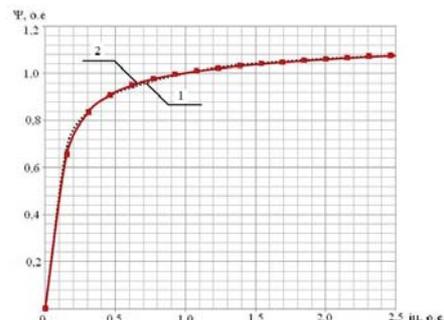


Рис. 4. Кривые намагничивания стали Э330 (в о.е.): 1 – реальная кривая намагничивания; 2 – аппроксимация функцией арктангенса

С учетом полученных результатов в среде системы моделирования Matlab были разработаны модели всех основных типов трансформаторов 6 – 10/0,4 кВ приемных подстанций мощностью от 630 до 10000 кВА со схемами соединения обмоток  $Y/\Delta$ -11 и  $Y/Y$ -0, а также питающих трансформаторов 110 – 220/6 – 10 кВ мощностью от 25 до 100 МВА, устанавливаемых на ЦП кабельных сетей 6–10 кВ.

**Влияние ВГ, генерируемых ДГР.** При расчетах ВГ в токах ОЗЗ часто принимается (например, [5, 6]), что ДГР не является значимым источником ВГ, так как имеет во всем диапазоне регулирования тока компенсации практически линейную характеристику намагничивания. Однако экспериментальные данные, приведенные, например, в [10, 11], показывают, что степень линейности вольт-амперной характеристики (характеристики намагничивания) ДГР существенно зависит от режима его работы<sup>1</sup>. Поэтому уровень ВГ, генерируемых ДГР, будет различным, в зависимости от режима работы дугогасящего реактора. Наибольшая степень нелинейности вольт-амперных характеристик (характеристик намагничивания) и, соответственно, наибольший уровень генерируемых гармоник для ступенчато-регулируемых ДГР (типа РЗДСОМ, ЗРОМ и др.) [10], а также плавнорегулируемых плунжерных ДГР (типа РЗДПОМ) [11] имеет место при работе в режимах с максимальными значениями напряжения и тока компенсации (рис. 5).

Анализ экспериментальных характеристик намагничивания для отдельных исполнений ДГР (РЗДПОМ, ЗРОМ) (рис. 5) показал, что при наибольшем рабочем напряжении и при предельном токе компенсации отклонения вольт-амперной характеристики ДГР от линейной составляют до 5 %. Вольт-амперные характеристики ДГР для разных токов компенсации с

<sup>1</sup> РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87). Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ.

достаточной точностью описываются в относительных единицах полиномом 5-го порядка:

$$U_*(I_*) = \psi_*(I_*) = a_5 I_*^5 + a_3 I_*^3 + a_1 I_*, \quad (1)$$

где  $a_1, a_3, a_5$  – коэффициенты;  $U_* = U/U_{ф.ном}$  – напряжение на ДГР;  $\psi_* = \psi/\psi_{ном}$  – потокосцепление;  $I_* = I/I_{отв.ном}$  – ток компенсации ДГР.

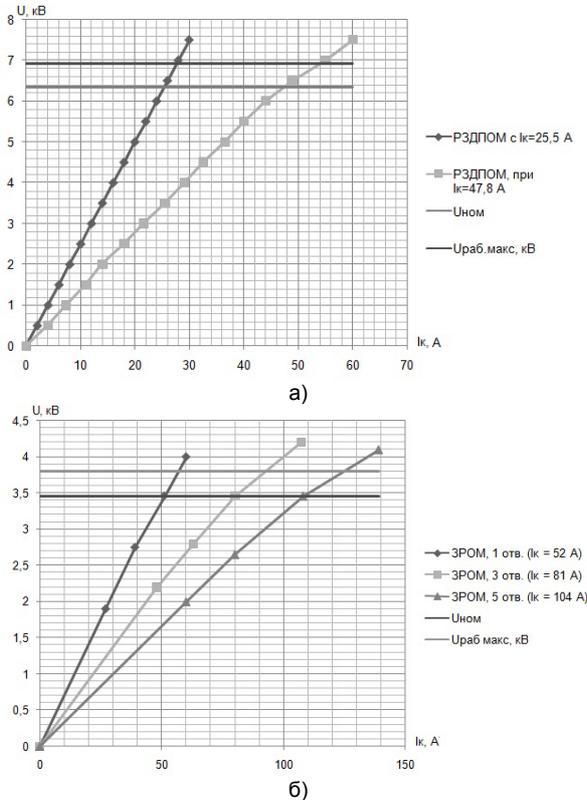


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики ДГР: а – плавно-регулируемого реактора типа РЗДПОМ; б – ступенчато-регулируемого реактора типа ЗРОМ

Результаты расчетов гармоник, генерируемых ДРГ плунжерного и ступенчатого типов при различных уровнях рабочего напряжения на ДГР и наибольшем токе компенсации, выполненные на моделях с аппроксимацией кривой намагничивания по уравнению (1), приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные значения ВГ, генерируемых ДГР при различных уровнях рабочего напряжения и наибольшем токе компенсации

№ гармоники $\nu$	$I_{\nu m}, \%$ , при $U_k$		
	$0,9U_{ф.ном}$	$U_{ф.ном}$	$1,1U_{ф.ном}$
1	100	100	100
3	0,655	1,097	1,888
5	0,157	0,294	0,565
7	0,009	0,042	0,109

Анализ данных табл. 2 показывает, что, в отличие от других источников ВГ, в сетях 6–10 кВ (вентильных преобразователей, трансформаторов и др.) в спектре ВГ, генерируемых ДГР, наиболее выражена 3-я гармоника. Общий

уровень значимых гармоник (3, 5 и 7-й), генерируемых ДГР в рассматриваемом режиме, составляет примерно 1,13%. По данным РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87), общий уровень гармоник в токе ДГР указанных типов обычно находится в пределах 1–1,5%.

Анализ на моделях ДГР показал также, что при работе ДГР с меньшими, чем предельный, токами компенсации степень линейности вольт-амперных характеристик значительно возрастает, а уровень генерируемых реактором гармоник резко уменьшается. В частности, для ступенчато-регулируемых ДГР при работе с  $I_{отв.ном}$  или для плавнорегулируемых плунжерных ДГР при работе с минимальным током компенсации уровень генерируемых ими гармоник, как показал анализ на моделях, практически равен нулю. Учитывая, что в эксплуатации такие режимы работы ДГР возможны, при оценке минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ ДГР из расчетной схемы сети 6–10 кВ можно исключить.

**Расчетная схема и параметры кабельной сети 6–10 кВ для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ.** С учетом изложенного выше расчетная модель компенсированной кабельной сети 6–10 кВ должна учитывать следующие основные факторы, влияющие на минимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ: мощность КЗ на шинах системы; мощность и параметры питающего трансформатора, установленного на ЦП; различное число трансформаторов разной мощности, установленных на приемных подстанциях (ТП, РТП), имеющих в общем случае различные параметры (ток намагничивания  $I_m$  в о.е., напряжение короткого замыкания  $u_k$  и др.); различие сопротивлений связи ТП и РТП с ЦП (длин и суммарного сечения кабельных линий); нагрузки приемных трансформаторов. В обобщенном виде расчетную схему сети напряжением 6–10 кВ, учитывающую влияние указанных основных факторов, можно представить в виде, показанном на рис. 6.

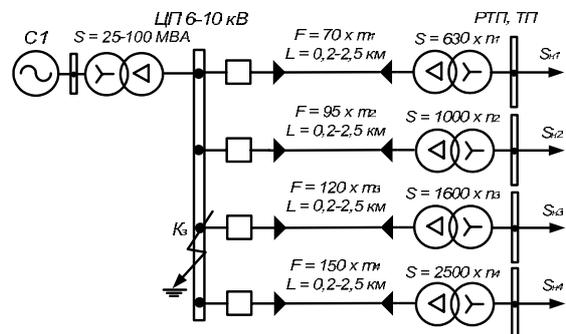


Рис. 6. Обобщенная схема сети 6–10 кВ для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ

Параметры элементов расчетной схемы (рис. 6) и диапазоны их изменения определены на основе статистического анализа данных по кабельным сетям 6–10 кВ систем электроснабжения предприятий ряда отраслей промышлен-

ности (металлургической, нефтеперерабатывающей, целлюлозно-бумажной) и систем городского электроснабжения (табл. 3).

Таблица 3. Параметры элементов расчетной схемы для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ

$I_{\Sigma\Sigma}$ , А	$I_{k.cист}^{(3)}$ , кА	$S_{пит.тр}$ , МВА	$L$ , км	$L_{ср.кп}$ , км	$S = \frac{S_{пит.тр}}{S_{\Sigma пр.тр}}$ , о.е.
20 – 100	20 – 40	25 – 100	0,3 – 2,5	0,8	0,7 – 1,5

В табл. 3 указаны значения следующих параметров элементов расчетной схемы:  $I_{\Sigma\Sigma}$  – суммарный емкостный ток сети;  $I_{k.cист}^{(3)}$  – значения тока трехфазного КЗ на шинах питающей системы;  $S_{пит.тр}$  – мощность питающего трансформатора, установленного на ЦП;  $L_{кп}$  – длина кабельных линий (КЛ), соединяющих ЦП с приемными подстанциями;  $S = S_{пит.тр} / S_{\Sigma пр.тр}$  – соотношение мощности питающего трансформатора и суммарной мощности трансформаторов приемных подстанций.

В табл. 4 показано распределение по величине единичной мощности трансформаторов, установленных на приемных подстанциях.

Таблица 4. Доля трансформаторов различной единичной мощности в сети и величины сечений линий связи между ЦП и приемными подстанциями

Параметр	Для трансформаторов нагрузки номинальной мощности $S_{ном}$ , кВА			
	630	1000	1600	2500
Доля в суммарной мощности трансформаторов нагрузки, %	25	64	7	4
Среднее сечение кабельной линии от ЦП до ТП (РТП), мм <sup>2</sup>	70	95	120	150

**Результаты расчетов уровня гармоник при ОЗЗ на модели кабельной сети 6–10 кВ.** Математическая модель кабельной сети 6–10 кВ для расчетной схемы рис. 6 реализована в среде системы Matlab.

На основе расчетов, выполненных на модели, определены минимальные уровни 5-й гармоники (в основном, определяющей общий минимальный уровень ВГ в токах ОЗЗ) для компенсированных сетей 6–10 кВ при различных значениях суммарного емкостного тока сети  $I_{\Sigma\Sigma}$  и параметра  $S = S_{пит.тр} / S_{\Sigma пр.тр}$ . В табл. 5 для сравнения даны также значения тока срабатывания устройства УСЗ-2/2 и расчетные оценки минимального уровня 5-й гармоники в токе ОЗЗ, полученные в конце 60-х годов XX в. [5, 6].

Минимальный уровень ВГ определялся для минимального значения рабочего напряжения в сети  $U_{раб} = 0,95U_{ном}$ . При расчетах параметры элементов сети варьировались в пределах, приведенных в табл. 3, 4.

Таблица 5. Расчетные значения 5-й гармоники в токе ОЗЗ

Ток 5-й гармоники в месте ОЗЗ	Значение тока $I_5$ , А			
	$I_{\Sigma\Sigma} = 25$ А	$I_{\Sigma\Sigma} = 50$ А	$I_{\Sigma\Sigma} = 100$ А	$I_{\Sigma\Sigma} = 250$ А
Расчет при $S = 0,7$	0,2–0,23	0,56–0,65	1,55–1,78	4,73–5,44
Расчет при $S = 1,5$	0,33–0,38	0,88–0,98	2,43–2,67	6,46–7,11
Расчет [5] при $S = 1,5$	0,65	1,3	2,6	6,5
Расчет [6] при $S = 0,75$	0,47	0,94	1,88	4,7
Ток срабатывания УСЗ-2/2 [1, 2]	0,95	1,4	2,5	4,85

Анализ данных, приведенных в табл. 5, показывает, что полученные по расчетам на модели оценки минимального уровня ВГ в токах ОЗЗ компенсированных сетей в 2–3 раза меньше аналогичных оценок, полученных в [5, 6], и в 3–4 раза меньше минимального тока срабатывания токовых устройств защиты от ОЗЗ на основе ВГ типа УСЗ-2/2.

Для защиты от ОЗЗ на основе ВГ рекомендуется иметь коэффициент чувствительности не менее 2–2,5 [8]. Для обеспечения такой чувствительности в минимальных по уровню ВГ режимах работы кабельных сетей 6–10 кВ минимальный первичный ток срабатывания существующих и разрабатываемых устройств защиты от ОЗЗ на основе ВГ следует уменьшить до значений  $\sim 0,1$  А.

## Заключение

Сформулированы основные требования к расчетной схеме замещения кабельной сети 6–10 кВ для оценки минимального уровня высших гармоник в токе ОЗЗ, определены диапазоны изменения и средние значения ее параметров.

Разработанная математическая модель кабельной сети 6–10 кВ учитывает основные факторы, определяющие минимальный уровень высших гармоник в токе ОЗЗ.

На основе результатов вычислительных экспериментов, выполненных на математических моделях кабельных сетей 6–10 кВ, установлено, что для обеспечения требуемой чувствительности устройства защиты от ОЗЗ, основанные на использовании высших гармоник, должны иметь первичный ток срабатывания не более 0,1 А.

## Список литературы

1. Кискачи В.М., Назаров Ю.Г. Сигнализация однофазных замыканий на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ // Труды ВНИИЭ. Вып. 16. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – С. 219–251.
2. Устройства сигнализации замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ / В.М. Кискачи, С.Е. Сурцева, Н.М. Горшенина и др. // Электрические станции. – 1972. – № 4. – С. 69–72.
3. Шуин В.А., Гусенков А.В., Мурзин А.Ю. Устройство типа «Спектр» для селективной защиты от однофазных замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ // Труды ИГЭУ. Вып. 2. – Иваново, 1997. – С. 200–203.

**4. Жежеленко И.В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

**5. Кискачи В.М.** Расчет минимального уровня высших гармоник при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью // Труды ВНИИЭ. Вып. 26. – М.: Энергия, 1966. – С. 89–105.

**6. Жежеленко И.В., Толпыго О.Б.** Чувствительность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник в сетях промышленных предприятий // Электричество. – 1969. – № 10. – С. 32–39.

**7. Борухман В.А.** Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию // Энергетик. – 2000. – № 1. – С. 20–22.

**8. Кискачи В.М.** Селективность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник // Электричество. – 1967. – № 9. – С. 24–29.

**9. Пиотровский Л.М.** Исследование режима холостого хода трансформатора // Электричество. – 1935. – № 1. – С. 23–28.

**10. Лихачев Ф.А.** Выбор, установка и эксплуатация дугогасящих аппаратов. – М.: Госэнергоиздат, 1955.

**11. Миронов И.А., Кричко В.А.** Особенности применения дугогасящих реакторов // Новости Электротехники. – 2007. – № 1 (43). – С. 36–41.

#### References

1. Kiskachi, V.M., Nazarov, Yu.G. Signalizatsiya odnofaznykh замыканий на zemlyu v kompensirovannykh kabel'nykh setyakh 6–10 kV [Fault-to-ground signalization in 6–10 kV resonant earthed cable networks]. *Trudy VNIIE* [Collected works of the All-Union Electric Power Research Institute]. Moscow, Gosenergoizdat, 1963, issue 16, pp. 219–251.

*Шуин Владимир Александрович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,  
телефон (4932) 26-99-05,  
e-mail: shuin@rza.ispu.ru

*Винокурова Татьяна Юрьевна,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,  
телефон (4932) 26-99-05,  
e-mail: tanya-vinokurova@mail.ru

*Шагурина Елена Сергеевна,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,  
телефон (4932) 26-99-05,  
e-mail: elena@shagurina.ru

2. Kiskachi, V.M., Surtseva, S.E., Gorshenina, N.M. *Elektricheskie stantsii*, 1972, no. 4, pp. 69–72.

3. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V., Murzin, A.Yu. Us-troystvo tipa «Spektr» dlya selektivnoy zashchity ot odno-faznykh замыканий на zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV [Spektr-type devices for selective signaling of line-to-ground faults in 6–10 kV cable networks]. *Trudy IGEU* [Collected works of Ivanovo State Power Engineering University]. Ivanovo, 1997, issue 2, pp. 200–203.

4. Zhezhelenko, I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy* [Higher harmonics in industrial supply systems]. Moscow, Energoatomizdat, 1984.

5. Kiskachi, V.M. Raschet minimal'nogo urovnya vysshikh garmonik pri odnofaznykh замыканий на zemlyu v setyakh s izolirovannoy i kompensirovannoy neytral'yu [Calculation of higher harmonics minimum level in case of line-to-ground faults in networks with insulated and resonant earthed neutrals]. *Trudy VNIIE* [Collected works of the All-Union Electric Power Research Institute]. Moscow, Energiya, 1966, issue 26, pp. 89–105.

6. Zhezhelenko, I.V., Tolpygo, O.B. *Elektrichestvo*, 1969, no. 10, pp. 32–39.

7. Borukhman, V.A. *Energetik*, 2000, no. 1, pp. 20–22.

8. Kiskachi, V.M. *Elektrichestvo*, 1967, no. 9, pp. 24–29.

9. Piotrovskiy, L.M. *Elektrichestvo*, 1935, no. 1, pp. 23–28.

10. Likhachev, F.A. *Vybor, ustanovka i ekspluatatsiya dugogasyashchikh apparatov* [Choosing, setting and exploitation of arc-suppressing reactors]. Moscow, Gosenergoizdat, 1955.

11. Mironov, I.A., Krichko, V.A. Osobennosti primeneniya dugogasyashchikh reaktorov [Operation of arc-suppressing reactors]. *Novosti ElektroTehniki*, 2007, no. 1 (43), pp. 36–41.