

УДК 621.311

Применение имитационного моделирования для оценки уровня неустойчивости высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ

Т.Ю. Винокурова, О.А. Добрягина, 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 компенсированных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения в качестве защиты от однофазных замыканий на землю с конца 60-х годов XX в. наиболее широкое применение получили устройства, основанные на способе абсолютного замера общего уровня высших гармоник в токах нулевой последовательности присоединений защищаемого объекта, однако многолетний опыт их эксплуатации показал не всегда достаточную селективность и чувствительность этих устройств. Чувствительность и селективность рассматриваемых устройств защиты в значительной мере определяются степенью неустойчивости общего уровня высших гармоник в токе замыкания на землю защищаемой сети, приближенные оценки которой даны в работах В.М. Кискачи. В настоящее время в связи с изменением состава нагрузки центров питания компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, прежде всего с увеличением доли нелинейных нагрузок, колебания уровня высших гармоник в токе замыкания на землю увеличились. В связи с этим актуальным является уточнение оценки неустойчивости гармоник в токе однофазного замыкания на землю с применением имитационных моделей компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ и накопленных экспериментальных данных по действующим сетям, а также условий применимости защит от данного вида повреждений на высших гармониках.

Материалы и методы: Исследование уровня неустойчивости высших гармоник в токе замыкания на землю проведено с применением имитационных моделей компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ в системе моделирования Matlab. Параметрирование имитационных моделей выполнено с учетом требований ГОСТ по составу и уровню высших гармоник в напряжениях и токах кабельных сетей 6–10 кВ, а также результатов статистического анализа данных по системам электроснабжения предприятий различных отраслей промышленности.

Результаты: Разработаны имитационные модели компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ и их элементов, являющихся источниками высших гармоник. Приведена методика выбора параметров моделей для оценки максимального и минимального уровней гармоник в токе однофазного замыкания на землю. На основе вычислительных экспериментов получены оценки неустойчивости уровня высших гармоник в токах замыкания на землю. Определена область применения токовых защит абсолютного замера высших гармоник с учетом полученных расчетных оценок неустойчивости гармоник.

Выводы: Результаты исследований могут быть применены при разработке новых устройств защиты на основе высших гармоник и для повышения эффективности функционирования существующих защит компенсированных сетей 6–10 кВ.

Ключевые слова: компенсированные кабельные сети 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, высшие гармоники, защита от однофазных замыканий на землю, имитационное моделирование, неустойчивость высших гармоник.

Application of simulation to evaluation of higher harmonics instability of single-phase earth fault current in 6–10 kv compensated cable networks

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

Abstract

Background: Protection devices based on the method of measuring the total absolute level of higher harmonics in zero sequence currents in protected object connections have been widely used for protection against single-phase earth faults in 6–10 kV compensated cable networks of industrial and urban electricity supply systems since the late 60s of the 20th century. However, the years of operation have proved their insufficient selectivity and sensitivity. The latter characteristics of these devices are largely determined by instability of the total level of higher harmonics in earth fault current of the protected network, the approximate estimates of which were given by Kiskachi V.M. Recent changes in the load composition of main substations of 6–10 kV compensated cable networks, in particular an increase in nonlinear loads share, have led to higher harmonics fluctuations in single-phase earth fault current. Thus, it is urgent to more accurately assess harmonics instability in single-phase earth fault current by applying simulation models of 6–10 kV compensated cable networks and accumulated experimental data about the networks in operation as well as the applicability of protection against such faults at the higher harmonics level.

Materials and Methods: The research into the higher harmonics instability level in the current single-phase earth fault was based on the application of simulation models of 6–10 kV compensated cable networks in the simulation system Matlab. The parameterization of simulation models corresponded to the State Standards (GOST) requirements for higher harmonics composition and level in the voltages and currents of 6–10 kV cable networks and the results of statistical data analysis of the power supply systems of various industries.

Results: We have developed simulation models of 6–10 kV compensated cable networks and their elements, which are higher harmonics sources, and described the methods of selecting model parameters for the estimation of the maximum and minimum levels of higher harmonics in single-phase earth fault current. We have also evaluated the higher harmonics instability in single-phase earth fault currents based on computational experiments and determined the application areas of current protections of higher harmonics absolute measurement based on the obtained instability level evaluation.

Conclusions: The research results can be applied to the development of new protection devices based on higher harmonics and to the improvement of operation efficiency of the existing protection systems of 6–10 kV compensated networks.

Key words: 6–10 kV compensated cable networks, single-phase earth fault, higher harmonics, protection against single-phase earth faults, simulation, higher harmonics instability.

Введение. Основная часть электрической энергии в системах промышленного и городского электроснабжения распределяется потребителям через электрические кабельные сети 6–10 кВ, работающие, как правило, с резонансным заземлением нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР) (с компенсацией емкостных токов). В таких сетях преобладающим видом повреждений (до 70–80 % от общего числа повреждений [1]) являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). В России в качестве защит компенсированных сетей от данного вида повреждений основное применение получили устройства, основанные на измерении общего уровня высших гармоник (ВГ) в токах нулевой последовательности присоединений защищаемого объекта и сравнении его с уставкой срабатывания [2–4]. К защитами данного типа относятся, в частности, устройства типа УСЗ-2/2, разработанные в начале 60-х годов во ВНИИЭ и с конца 60-х годов серийно выпускаемые Чебоксарским электроаппаратным заводом (ЧЭАЗ). Функция токовой защиты, основанной на использовании принципа абсолютного замера общего уровня ВГ, предусмотрена также в микропроцессорных терминалах релейной защиты и автоматики для присоединений 6–10 кВ некоторых фирм-производителей.

Многолетний опыт эксплуатации токовых защит абсолютного замера ВГ показал не всегда достаточную эффективность их функционирования в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ (например, [5]). Поэтому исследование причин, ограничивающих эффективность функционирования указанных защит от ОЗЗ, и разработка способов ее повышения являются актуальной задачей.

Условия применимости токовых защит абсолютного замера ВГ. В рассматриваемых устройствах защиты, как правило, используется ограниченный спектр ВГ, включающий гармоники $\nu = 5, 7, 11, 13$ [2–4]. Рабочий диапазон частот устройств защиты на основе ВГ обусловлен тем, что основные источники высших гармоник в кабельных сетях 6–10 кВ генерируют преимущественно указанные гармо-

ники [6]. В диапазоне частот до 650 Гц с достаточной точностью можно принять, что распределение ВГ в токах нулевой последовательности при ОЗЗ соответствует распределению емкостных токов промышленной частоты в сети с изолированной нейтралью [7]. С учетом этого ток срабатывания защиты на i -м присоединении должен выбираться из условия несрабатывания при внешних ОЗЗ [8]

$$I_{0\text{ с.з.}i} \geq K_{\text{отс}} \alpha_1 I_{ci}, \quad (1)$$

где $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки; I_{ci} – собственный емкостный ток i -го присоединения; α_1 – максимально возможный уровень ВГ в токе I_{ci} (в о.е.) в контролируемой сети.

Выбранный из условия (1) ток срабатывания должен быть не меньше, чем минимальный ток срабатывания $I_{0\text{ с.з.}i\text{ мин}}$, определяемый техническими возможностями устройства защиты:

$$I_{0\text{ с.з.}i} \geq I_{0\text{ с.з.}i\text{ мин}}. \quad (2)$$

Коэффициент чувствительности защиты при внутреннем ОЗЗ на i -м присоединении определяется по формуле

$$K_{ci} = \frac{\alpha_2 (I_{c\Sigma} - I_{ci})}{I_{0\text{ с.з.}i}} \geq K_{\text{ч.мин.доп}}, \quad (3)$$

где $I_{c\Sigma}$ – суммарный емкостный ток сети; α_2 – минимальный уровень ВГ в токах $I_{c\Sigma}$ и I_{ci} ; $K_{\text{ч.мин.доп}}$ – минимально допустимый коэффициент чувствительности защиты.

При $I_{0\text{ с.з.}i} = I_{0\text{ с.з.}i\text{ мин}}$ коэффициент чувствительности защиты можно определить следующим образом:

$$K_{ci} = \frac{\alpha_{\text{мин}} (I_{c\Sigma} - I_{ci})}{I_{0\text{ с.з.}i\text{ мин}}} = \frac{\alpha_{\text{мин}} I_{c\Sigma} (1 - I_{ci}^*)}{I_{0\text{ с.з.}i\text{ мин}}} \geq K_{\text{ч.мин.доп}}, \quad (4)$$

где $\alpha_{\text{мин}} I_{c\Sigma} = I_{\text{ВГ мин}}$ – минимально возможный уровень ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

Из (1)–(4) получим условия применимости (селективности и чувствительности) указанной защиты:

$$I_{ci*} = \frac{I_{ci}}{I_{c\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)_{\max} K_{отс} K_{ч.мин.доп}} = \frac{1}{1 + Z_{\max} K_{отс} K_{ч.мин.доп}}; \quad (5)$$

$$I_{0\text{ с.з.мин}} \leq \frac{\alpha_{\min} I_{c\Sigma} (1 - I_{ci* \max})}{K_{ч.мин.доп}}, \quad (6)$$

где $Z_{\max} = (\alpha_1 / \alpha_2)_{\max}$ – максимальное значение параметра, характеризующего степень неустойчивости общего уровня ВГ в токе ОЗЗ в защищаемой кабельной сети 6–10 кВ.

Согласно (5) и (6), на условия применимости токовых защит абсолютного замера ВГ влияют два основных фактора:

1) минимальный уровень гармоник в токе ОЗЗ (и соответственно, в токе I_{ci} поврежденного присоединения), характеризующий величиной $\alpha_{\min} I_{c\Sigma} = I_{ВГ\text{ мин}}$ и определяющий требования к чувствительности защит от ОЗЗ на основе ВГ;

2) степень неустойчивости общего уровня ВГ в токе ОЗЗ, характеризующая параметром

$$Z_{\max} = \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)_{\max}. \quad (7)$$

Оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ $I_{ВГ\text{ мин}}$ на основе упрощенных схем замещения компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ даны в работах В.М. Кискачи и И.В. Жежеленко в конце 60-х годов XX в. [9, 10]. Указанные оценки уточнены в [11] с использованием имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ, учитывающих большее число влияющих на общий уровень ВГ в токе ОЗЗ факторов, чем упрощенные модели, используемые в [9, 10].

В работе В.М. Кискачи [7] приводится также оценка параметра Z , характеризующего степень неустойчивости ВГ в токе ОЗЗ, полученная на основе упрощенных аналитических методов расчета, моделей кабельных сетей 6–10 кВ и отдельных экспериментальных данных: $Z \approx 2,5\text{--}3$. С некоторым запасом в [7] рекомендуется принимать $Z_{\max} = 4$.

При $K_{отс} = 1,5$, $K_{ч.мин} = 1,5$ и $Z = 4$ из (5) получим, что токовые защиты абсолютного замера ВГ применимы на присоединениях с собственным емкостным током

$$I_{ci*} \leq \frac{1}{1 + 4 \cdot 1,5 \cdot 1,5} = 0,1,$$

что совпадает с рекомендациями [7].

По данным [12], доля таких присоединений, подключенных к шинам 6–10 кВ центра питания (ЦП) (ГПП, ГРУ ТЭЦ), от общего числа составляет: для ГПП – около ~70 %, для ГРУ ТЭЦ – ~90 %. Однако практические показатели селективности работы токовых защит абсолютного замера ВГ, установленных на центрах питания компенсированных кабельных сетей

6–10 кВ, значительно хуже, чем можно было бы ожидать при указанных условиях их применимости [5]. Можно полагать, что основной причиной недостаточно высокой селективности рассматриваемых защит от ОЗЗ является большая, чем до сих пор принимается, степень неустойчивости общего уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. При $Z > 4$ значения I_{ci*} , при которых возможно обеспечение условий селективности и чувствительности токовых защит абсолютного замера ВГ, как следует из (5), уменьшаются, и, соответственно, уменьшается и область их возможного применения на объектах компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. Поэтому оценки возможного диапазона изменения параметра Z актуальны как для уточнения области применения существующих токовых защит на основе ВГ, так и для выбора путей повышения их технического совершенства.

Оценка предельных значений параметра Z для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. Предельное значение параметра Z , характеризующего степень неустойчивости общего уровня ВГ в токе ОЗЗ, определяется соотношением

$$Z_{\text{пр}} = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}}, \quad (8)$$

где $\alpha_{\max} = I_{ВГ\text{ макс}} / I_{c\Sigma}$ – максимально возможный уровень высших гармоник в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ; $\alpha_{\min} = I_{ВГ\text{ мин}} / I_{c\Sigma}$ – минимально возможный уровень высших гармоник в токе ОЗЗ.

При оценке $Z_{\text{пр}}$ по (8) должны учитываться только гармоники рабочего диапазона устройств защиты от ОЗЗ, основанных на использовании ВГ токов нулевой последовательности $v = 5, 7, 11, 13$. Расчетная оценка минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ дана, как уже отмечалось выше, в работах [9–11]. В [9–11] принимается, что минимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ определяется в предельном случае только гармониками, генерируемыми силовыми трансформаторами 6–10/0,4 кВ приемных подстанций. Практически такие режимы работы кабельных сетей 6–10 кВ возможны при суточных графиках нагрузки, предусматривающих останов производства в ночные смены и по выходным дням¹. В кабельных сетях, ЦП которых являются шины 6–10 кВ ГРУ ТЭЦ, кроме трансформаторов, источником ВГ, определяющим их минимальный уровень в токе ОЗЗ, являются также генераторы, работающие на сборные шины. Поэтому минимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ следует ожидать в кабельных сетях, ЦП которых являются шины 6–10 кВ ГПП.

¹ РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.

При указанном допущении уровень ВГ в токе ОЗЗ зависит от отношения суммарной мощности трансформаторов приемных подстанций к мощности питающего трансформатора ГПП $s = \sum_{i=1}^n S_{пр} / S_{пит}$. По данным обследования реальных сетей, приведенным в [9], $s = 0,7-3$.

В токах намагничивания силовых трансформаторов и, соответственно, в токах ОЗЗ в основном выражены 5 и 7-я гармоники [6–11]. В табл. 1 приведены оценки минимального уровня указанных гармоник в токе ОЗЗ для компенсированной кабельной сети с $I_{сз} = 25$ А (для кабельных сетей 10 кВ $I_{сз мин} = 20$ А, для сетей 6 кВ $I_{сз мин} = 30$ А) при среднем значении параметра $s = 1,5$, полученные на основе результатов расчетов, приведенных в [9–11].

Таблица 1. Оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ

Источник данных	I_5 , %	I_7 , %	$\alpha_{мин}$, %
Расчеты по упрощенным схемам замещения кабельных сетей 6–10 кВ [9] и [10]	2,6–2,7	2,0–2,1	~3,37
Расчеты на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ [11]	0,92–1,07	0,48–0,53	~1,12

Гармонический состав тока в месте ОЗЗ и токов нулевой последовательности $3I_0$ поврежденного и неповрежденных присоединений с достаточной точностью определяется гармоническим составом напряжения поврежденной фазы в месте замыкания на землю [7]. Поэтому максимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ $\alpha_{макс}$ приближенно можно оценить по предельно допустимым ГОСТ 13109-97² для сетей 6–10 кВ значениям коэффициента несинусоидальности напряжения $K_{нс макс} = 0,08$ и предельно допустимым коэффициентам $K_{Uv пред}$ отдельных гармонических составляющих $v = 5, 7, 11, 13$, определяемых по выражению $K_{Uv пред} = 1,5 K_{Uv норм}$ (табл. 2). Наибольший уровень ВГ в токе ОЗЗ гармоник $v = 5, 7, 11, 13$ будет иметь место, если принять, что $K_{нс}$ определяется только указанными гармониками.

Таблица 2. Значения нормально и предельно допустимых коэффициентов несинусоидальности напряжения для гармоник рабочего диапазона частот

v	5	7	11	13
$K_{Uv норм}$, %	4	3	2	2
$K_{Uv пред}$, %	6	4,5	3	3

² ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Оценим $K_{нс}$ при указанных в табл. 2 значениях $K_{Uv пред}$:

$$K_{нс макс} = \sqrt{\sum_v K_{Uv пред}^2} = \sqrt{K_{U5 пред}^2 + K_{U7 пред}^2 + K_{U11 пред}^2 + K_{U13 пред}^2} = \frac{100}{\sqrt{6^2 + 4,5^2 + 3^2 + 3^2}} = 0,0862,$$

что больше предельно допустимого значения 0,08.

Для выполнения условия $K_{нс макс} \leq 0,08$ для гармоники минимального порядка $v = 5$ необходимо принять $K_{U5 пред} = 5,1 \% < K_{U5 пред}$. Тогда при определенных рассмотренным способом относительных уровнях гармонических составляющих напряжения общий относительный уровень ВГ в токе ОЗЗ будет равен

$$\alpha_{макс\%} = K_{нс\%} = 100 \sqrt{\sum_v I_v^2} = 100 \sqrt{\sum_v \left(\frac{K_{Uv пред}}{100} \right)^2} = \sqrt{(5K_{U5 пред})^2 + (7K_{U7 пред})^2 + (11K_{U11 пред})^2 + (13K_{U13 пред})^2} \approx 65\%.$$

Полученному рассмотренным способом значению $\alpha_{макс} = 65\%$ и наиболее жесткой оценке по [11] $\alpha_{мин} = 1,12\%$ соответствует значение $Z_{пр. расч} = 65/1,12 \approx 58$.

Измерения уровня ВГ в токах ОЗЗ действующих кабельных сетей 6–10 кВ показывают, что приведенная оценка $\alpha_{мин}$, скорее всего, является заниженной, так как при расчетах не учитывалось влияние ряда дополнительных источников ВГ: системы, ДГР и др. По данным [14], в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ минимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ, как правило, не менее 4 %.

В [15] на основе измерений в действующих кабельных сетях 6–10 кВ показано, что максимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ может достигать значений 35–40 % и более. Невозможно видеть, что экспериментальные оценки ($\alpha_{макс} = 40\%$ и более) относительно близки к полученной выше предельной расчетной оценке $\alpha_{макс. расч} \approx 65\%$. Если принять, что $\alpha_{мин} \approx \alpha_{мин. изм} = 4\%$, а $\alpha_{макс} = \alpha_{макс. расч} = 65\%$, то $Z_{пр} \approx 65/4 \approx 16$.

Для конкретной кабельной сети 6–10 кВ $Z \leq Z_{пр}$.

Основные факторы, влияющие на нестабильность уровня ВГ в токе ОЗЗ. В конкретной кабельной сети 6–10 кВ значение параметра Z зависит от множества факторов, основными из которых являются:

- 1) состав источников ВГ комплексной нагрузки ЦП кабельной сети 6–10 кВ;
- 2) суточные графики работы нагрузки ЦП;
- 3) особенности режимов работы основных источников ВГ;

4) параметры элементов кабельной сети (соотношение мощности питающего трансформатора и суммарной мощности трансформаторов приемных подстанций, сопротивление питающей системы, сопротивления кабельных линий, соединяющих шины 6–10 кВ ЦП с приемными подстанциями, и др.).

Гармонический состав тока ОЗЗ определяется гармоническим составом фазных напряжений сети [10]. Источниками ВГ в напряжения кабельных сетей 6–10 кВ являются (рис. 1): питающая система С, питающий трансформатор $T_{пит}$, силовые трансформаторы приемных трансформаторных и распределительно-трансформаторных подстанций $T_{пр}$, нелинейная нагрузка НН, электродвигатели М. При возникновении замыкания на землю дополнительным источником ВГ в токе ОЗЗ является также ДГР.

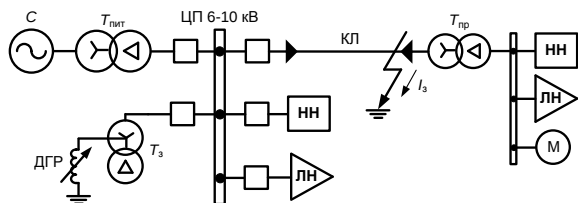


Рис. 1. Источники ВГ в компенсированной кабельной сети 6–10 кВ

В компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ основными источниками ВГ в напряжения являются нелинейные нагрузки [6]: нелинейные управляемые и неуправляемые вентильные преобразователи (НП), электротермические установки (ЭТУ), электросварочные установки (ЭСУ), а при отсутствии (например, при отключении) в составе комплексной нагрузки НП, ЭТУ и ЭСУ – трансформаторы приемных подстанций $T_{пр}$. В среднем относительные значения токов ВГ, генерируемых нелинейными вентильными преобразователями, в токах нагрузки составляют: для 5-й гармоники – ~20 %; для 7-й гармоники – ~14 %; для 11-й гармоники – ~9 %; для 13-й гармоники – ~8 % [6]. Аналогичные уровни ВГ генерируют также электросварочные установки, имеющие преобразователи переменного тока в постоянный. Среди ЭТУ основными источниками ВГ являются различного типа электропечи (дуговые сталеплавильные, руднотермические, ферросплавные и др.). Источником гармоник, генерируемых электропечами, является нелинейная электрическая дуга, а в электропечах постоянного тока также и вентильные преобразователи переменного тока в постоянный. Уровень ВГ в токах нагрузки, генерируемых электропечами, сопоставим с уровнем гармоник, генерируемых НП [6]. Уровень гармоник в токах нагрузки, генерируемых силовыми трансформаторами, обычно составляет несколько процентов [6, 9–11].

Относительные значения гармоник, генерируемых эквивалентной системой С, пи-

тающим трансформатором $T_{пит}$, электродвигателями М, нелинейной осветительной нагрузкой, в токах нагрузки, как правило, не превышают в сумме единиц процентов, и при оценке коэффициента несинусоидальности напряжения сети $K_{нс.У}$ влиянием указанных источников на общий уровень ВГ пренебрегают [6].

Наличие таких источников ВГ, как НП, ЭТУ, ЭСУ, характерно, в первую очередь, для кабельных сетей 6–10 кВ систем электроснабжения промышленных предприятий. В табл. 3 приведен типовой состав узлов комплексной нагрузки, содержащей основные источники ВГ, для предприятий различных отраслей промышленности³.

Таблица 3. Типовой состав комплексной нагрузки ЦП, содержащей основные источники ВГ

Отрасль народного хозяйства	Состав потребителей узла комплексной нагрузки, %						
	СД	АДВ	АДН	ЭО	ЭТУ	ЭСУ	НП
Цветная металлургия	10	5	27,5	1,5	10	–	46
Химическая промышленность	35±7	15±6	29±8	~2,4	~3	~1	~12
Угледобыча шахтная	4	7	67	15	–	–	7
Черная металлургия	25	8	29,5	2,5	22	3	10
Автомобилестроение	9	10	48	5	19	3	6
Машиностроение	8	5	52	5	13	14	3
Электротяга	–	–	5	5	–	–	90

Примечание: СД – синхронные электродвигатели; АДВ – асинхронные электродвигатели высоковольтные; АДН – асинхронные электродвигатели низковольтные; ЭО – электрическое освещение; ЭТУ – электротермические установки; ЭСУ – электросварочные установки; НП – нелинейные преобразователи переменного тока в постоянный.

Доля основных источников ВГ (НП, ЭТУ, ЭСУ) в составе общей нагрузки ЦП кабельных сетей 6–10 кВ указанных в табл. 3 отраслей промышленности в среднем составляет около 15–50 %, но для отдельных промышленных производств может достигать 90 % (например, электротяговые подстанции, прокатное производство, мощные электродуговые сталеплавильные печи постоянного тока на металлургических заводах, ферросплавное производство и др.). Изменения режимов работы или полный вывод из работы (отключение) основных источников ВГ и являются, как правило, главной причиной значительных изменений общего уровня гармоник в напряжениях и, соответственно, в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ.

Относительные значения гармоник в токах нагрузки существенно зависят от суточных графиков нагрузки ЦП. Характерные суточные графики нагрузок [13] для рассматриваемых в

³ РД 153-34.0-20.527-98.

табл. 3 отраслей промышленности приведены на рис. 2.

Большие колебания общего уровня ВГ в течение суток и рабочей недели следует ожидать, прежде всего, на предприятиях, работающих в сменах с выходным днем, когда возможно значительное уменьшение общей нагрузки, сопровождаемое частичным или полным отключением основных источников ВГ (например, черная металлургия (ЧМ), автомобилестроение (АС)). Более стабильный уровень ВГ следует ожидать на предприятиях, имеющих непрерывное производство (цветная металлургия (ЦМ), химическая промышленность (ХП)).

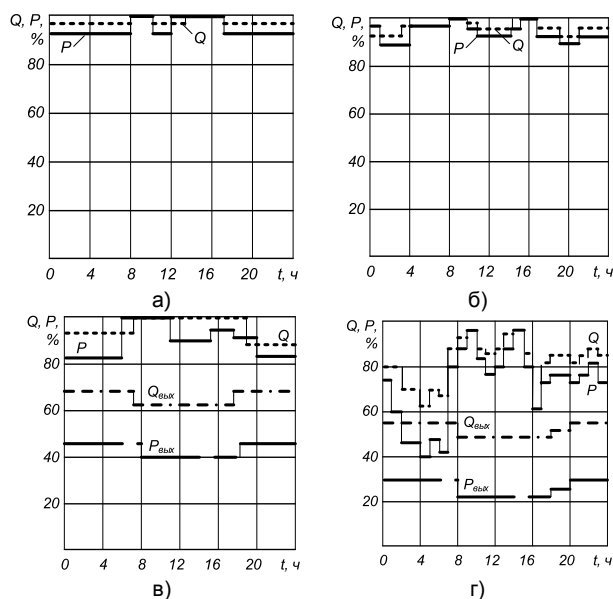


Рис. 2. Характерные суточные графики нагрузок предприятий различных отраслей промышленности: а – цветная металлургия; б – химия; в – черная металлургия; г – автомобилестроение

Уровень гармоник, генерируемых неуправляемыми вентильными преобразователями, определяется текущим значением нагрузки. Уровень гармоник, генерируемых управляемыми вентильными преобразователями, существенно меняется при изменениях угла управления α и угла коммутации γ [6]. Например, при изменениях углов управления и коммутации от $\alpha = 0^\circ$, $\gamma = 0^\circ$ до значений $\alpha = 30^\circ$, $\gamma = 60^\circ$ относительные значения основных гармоник в токах нагрузки преобразователя данного типа уменьшаются в ~ 3 – 5 раз [6].

Циклический режим работы, обуславливающий колебания уровня ВГ, имеют ЭСУ. По данным [16], уровень основных гармоник, генерируемых ЭСУ с преобразователями переменного тока в постоянный, в зависимости от режима их работы может изменяться в ~ 3 – 6 раз (табл. 4).

Таблица 4. Значения гармонических составляющих тока и напряжения одноточечных ЭСУ

v	5	7	11	13	Σ
$U_{v \text{ мин}}, \%$	0,7	0,4	0,2	0,2	0,9
$U_{v \text{ макс}}, \%$	2	2	1,2	1,2	3,3
$U_{v \text{ макс}}/U_{v \text{ мин}}$	2,85	5	6	6	3,67

Таким образом, при оценке нестабильности уровня ВГ в токах нагрузки, обусловленных вентильными преобразователями и ЭСУ, ориентировочно можно принять, что их уровень в зависимости от режима их работы может меняться от 3 до 5–6 раз.

В цикле работы различного рода электропечей имеются периоды, связанные с загрузкой печи, выгрузкой металла, когда печь не является источником ВГ, что также должно учитываться при оценке степени нестабильности ВГ в токах ОЗЗ.

Наибольшую степень нестабильности уровня ВГ в напряжениях сети и, соответственно, в токе ОЗЗ следует ожидать в кабельных сетях 6–10 кВ, питаемых от электротяговых подстанций из-за большой доли в составе нагрузки НП и резкопеременного режима нагрузки. Однако на таких подстанциях применение токовых защит от ОЗЗ, основанных на способе абсолютного замера ВГ, никогда не рекомендовалось, и ниже они не рассматриваются.

Исследование нестабильности общего уровня ВГ в токе ОЗЗ на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ. Учет влияния рассмотренных выше факторов на уровень ВГ в напряжениях и, соответственно, в токе ОЗЗ сети, обусловленных составом комплексной нагрузки ЦП, суточными графиками их нагрузки, режимами работы основных источников ВГ и особенностями конфигурации и параметров элементов кабельных сетей 6–10 кВ, невозможен при использовании упрощенных схем замещения кабельных сетей 6–10 кВ. Поэтому для оценки возможных колебаний уровня ВГ в токе ОЗЗ были использованы имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ, позволяющие учесть максимальное число влияющих факторов.

Расчеты на имитационных моделях выполнены для ЦП кабельных сетей 6–10 кВ отраслей промышленности, суточные графики которых приведены на рис. 2, характеризующихся значительной долей в составе нагрузки НП, ЭСУ, ЭТУ. Расчетная модель для оценки степени нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ систем электроснабжения предприятий указанных отраслей промышленности может быть представлена в виде, приведенном на рис. 3.

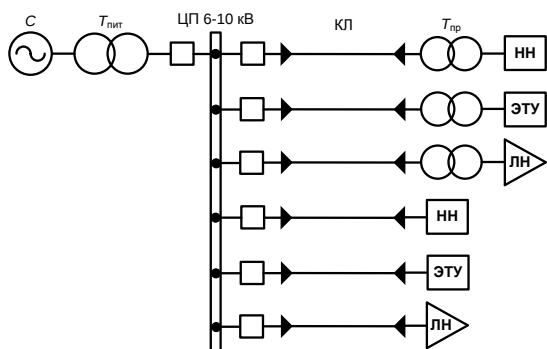


Рис. 3. Расчетная модель компенсированной кабельной сети 6–10 кВ системы электроснабжения промышленного предприятия для оценки степени нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ

Состав комплексной нагрузки ЦП варьировался в зависимости от отрасли промышленности в соответствии с табл. 3. Параметры элементов расчетной схемы были определены на основе статистической обработки данных по кабельным сетям 6–10 кВ промышленного электроснабжения различных отраслей промышленности (табл. 5). При расчетах максимального уровня ВГ в токе ОЗЗ принимались следующие допущения:

- предприятие рассматриваемой отрасли работает в режиме максимальной нагрузки в соответствии с суточным графиком;
- все основные источники ВГ включены (в работе);
- основные источники ВГ (НП, ЭСУ, ЭТУ) работают в режиме, обуславливающем максимальный уровень ВГ токах нагрузки;
- напряжение на шинах ЦП равно $1,05U_{ном}$.

При расчетах минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ принимались следующие допущения:

- предприятие рассматриваемой отрасли работает в режиме минимальной нагрузки в соответствии с суточным графиком;
- доля нелинейной нагрузки уменьшается пропорционально уменьшению общей нагрузки ЦП;
- ЭТУ могут быть полностью выведены из работы как источники ВГ;
- минимальный уровень ВГ, генерируемых НП и ЭСУ, в 2–3 раза меньше, чем максимальный;
- напряжение на шинах ЦП равно $U_{ном}$.

В табл. 6 приведены полученные на имитационных моделях кабельных сетей оцен-

ки параметра Z для отдельных гармоник $\nu = 5, 7, 11, 13$ и суммы указанных гармонических составляющих, используемых в защитах от ОЗЗ на основе ВГ.

Расчеты выполнены для следующих условий:

- номинальное напряжение сети $U_{ном} = 6$ кВ;
- суммарный емкостный ток сети $I_{с\sum} = 25$ А;
- мощность питающего трансформатора $S_{пит. тр} = 31,5$ МВА (63/2);
- суммарная мощность трансформаторов приемных подстанций $S_{\sum пр. тр} = 47,25$ МВА;
- $s = S_{\sum пр. тр} / S_{пит. тр} = 1,5$;
- коэффициент загрузки трансформаторов приемных подстанций $K_{загр} = 0,7$.

Таблица 6. Расчетные значения уровня нестабильности ν -й гармоники Z_ν и Z_Σ для гармоник $\nu = 5, 7, 11, 13$ в токе ОЗЗ

Отрасль промышленности	Z_ν				
	$\nu = 5$	$\nu = 7$	$\nu = 11$	$\nu = 13$	Z_Σ
ЦМ	3,36	2,77	1,25	0,85	2,01
ХП	5,29	5,11	3,96	3,44	4,38
ЧМ	9,22	7,57	3,98	2,98	4,99
АС	11,1	8,61	4,9	2,59	5,87

Анализ данных табл. 6 показывает, что, как и следовало ожидать, степень нестабильности общего уровня ВГ в токе ОЗЗ выше в кабельных сетях 6–10 кВ систем электроснабжения предприятий со сменным режимом работы. Отметим также, что полученные оценки параметра Z больше рекомендуемых в [7] для использования при расчетах токовых защит на основе ВГ, но существенно меньше приведенных выше предельных значений.

Если принять $Z_{макс} = 6$, из (5) получим, что токовые защиты абсолютного замера ВГ можно применить на присоединениях, собственный емкостный ток которых не превышает значений

$$I_{ci}^* = \frac{I_{ci}}{I_{с\sum}} \leq \frac{1}{1 + Z_{макс} K_{отс} K_{ч. мин. доп}} = \frac{1}{1 + 6 \cdot 1,5 \cdot 1,5} \approx 0,07.$$

Доля таких присоединений на ЦП кабельных сетей 6–10 кВ, по данным [12], не превышает 65–70 %, что заметно ограничивает область возможного применения токовых защит абсолютного замера ВГ.

Таблица 5. Параметры элементов расчетной схемы для оценки степени нестабильности ВГ в токе ОЗЗ

$I_{с\sum}$, А	$I_{(3)}^{(3)}$ к сист., кА	$S_{пит. тр}$, МВА	$K_{загр}$, о.е.	L , км	$L_{ср. КЛ}$, км	$s = \frac{S_{пит. тр}}{S_{\sum пр. тр}}$, о.е.	$S_{НП} = \frac{S_{НП}}{S_{\sum пр. тр}}$, о.е.	$S_{НП ср*}$, о.е.	$U_{с. макс}$, В	$U_{с. мин}$, В
25	10–20	25–100	0,7	0,3–2,5	0,8	0,7–1,5	0,1–0,9	0,3	6300	6000

Дополнительные ограничения области применения рассматриваемых защит связаны с приближенным характером методики выбора уставки по току срабатывания $I_{0с.з}$, что приводит к необходимости увеличения $K_{отс}$ в (5). Например, в [14] рекомендуется принимать $K_{отс} = 3-4$ из-за невозможности рассчитать максимальный и минимальный уровни ВГ. При таких значениях $K_{отс}$ токовые защиты абсолютного замера ВГ практически не имеют области применения в кабельных сетях. Поэтому при разработке устройств защиты на основе ВГ предпочтение должно отдаваться способам, обеспечивающим селективность в условиях нестабильности спектра и уровня гармоник в токе ОЗЗ, например, направленным или токовым адаптивным защитами.

Заключение

Область возможного применения токовых защит абсолютного замера ВГ в значительной мере ограничивается степенью нестабильности общего уровня гармоник в токе ОЗЗ. Наибольшие колебания уровня ВГ следует ожидать в компенсированных сетях 6–10 кВ систем электроснабжения промышленных предприятий, работающих по сменному суточному графику с выходными днями, значительную долю нагрузки которых составляют НП и ЭТУ. На основе расчетов на имитационных моделях определены значения нестабильности ВГ в токе ОЗЗ: для предприятий с непрерывным графиком нагрузки $Z_{\max} \approx 4,5$; для предприятий с переменным графиком нагрузки $Z_{\max} \approx 6$. При $Z_{\max} = 6$ токовые защиты абсолютного замера ВГ могут быть использованы только на присоединениях, собственный емкостный ток которых не превышает 7% от $I_{с\sum}$.

С учетом полученных значений нестабильности область применения токовых защит абсолютного замера ВГ заметно ограничена, и предпочтение следует отдавать разработке защит, условия селективности и чувствительности которых не зависят от Z , например направленных и токовых адаптивных защит.

Список литературы

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971.
2. Кискачи В.М., Назаров Ю.Г. Устройства сигнализации замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ // Сигнализация замыканий на землю в компенсированных сетях / под ред. В.И. Иоэльсона. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – С. 39–66.
3. 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.
4. Устройствa 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.

5. 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.

6. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2000.

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

8. Шуин В.А., Сарбеева О.А., Шагурина Е.С. Информационные параметры электрических величин переходного процесса для использования в защитах от замыканий на землю сетей среднего напряжения // Сборник докладов Междунар. науч.-техн. конф. СИГРЭ «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – СПб., 2011.

9. Кискачи В.М. Расчет минимального уровня высших гармоник при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью // Работы в области релейной защиты и автоматики: тр. ВНИИЭ. Вып. 26. – М.: Энергия, 1966. – С. 89–105.

10. 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.

11. Винокурова Т.Ю., Шагурина Е.С., Шуин В.А. Математическая модель для оценки минимального уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6. – С. 35–41.

12. Шагурина Е.С. Повышение эффективности функционирования в переходных режимах устройств релейной защиты на основе высших гармоник: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2012.

13. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов и др.; под ред. С.С. Рокотьяна и И.М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

14. Алексеев В.Г. Токовая защита ЗГНП-4.2 от замыканий на землю в обмотке статора генератора, работающего на сборные шины // Электрические станции. – 2006. – № 2. – С. 51–56.

15. Вайнштейн В.Л. Исследование высших гармоник тока замыкания на землю // Промышленная энергетика. – 1986. – № 1. – С. 39–40.

16. Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. – М.: Академия, 2011.

References

1. Likhachev, F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiey emkostnykh tokov* [Earth faults in networks with isolated neutral and compensated capacitive currents]. Moscow, Energiya, 1971.
2. Kiskachi, V.M., Nazarov, Yu.G. *Ustroystva signalizatsii zamykaniy na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV* [Signaling devices of earth faults in 6–10 kV cable networks]. *Signalizatsiya zamykaniy na zemlyu v kompensirovannykh setyakh* [Earth fault signaling in compensated networks]. Moscow, Gosenergoizdat, 1962, pp. 39–66.
3. Kiskachi, V.M., Nazarov, Yu.G. *Signalizatsiya odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v kompensirovannykh kabel'nykh setyakh 6–10 kV* [Signaling of single phase earth fault in 6–10 kV cable networks with resonant grounding]. *Trudy VNIIE* [Collected works of the All-Union Electric Power Research Institute]. Moscow, Gosenergoizdat, 1963, issue 16, pp. 219–251.
4. Kiskachi, V.M., Surtseva, S.E., Gorshenina, N.M. *Ustroystva signalizatsii zamykaniy na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV* [Signaling devices of earth faults in 6–10 kV cable networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1972, no. 4, pp. 69–72.
5. Borukhman, V.A. *Ob ekspluatatsii selektivnykh zashchit ot zamykaniy na zemlyu v setyakh 6–10 kV i meropriyatiyakh po ikh sovershenstvovaniyu* [On operation of selective protection systems against earth faults in 6–10 kV networks and their improvement]. *Energetik*, 2000, no. 1, pp. 20–22.

6. Zhezhelenko, I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy* [Higher harmonics in industrial supply systems]. Moscow, Energoatomizdat, 2000.

7. Kiskachi, V.M. *Selektivnost' signalizatsii zamykaniy na zemlyu s ispol'zovaniem vysshikh garmonik* [Selectivity of earth fault signaling using higher harmonics]. *Elektrichestvo*, 1967, no. 9, pp. 24–29.

8. Shuin, V.A., Sarbeeva, O.A., Shagurina, E.S. *Informatsionnye parametry elektricheskikh velichin perekhodnogo protsessa dlya ispol'zovaniya v zashchitakh ot zamykaniy na zemlyu setey srednego napryazheniya* [Information parameters of electrical quantities of the transition process to be used in protection against earth faults in medium voltage networks]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii SIGRE «Sovremennye napravleniya razvitiya sistem releyНОЙ zashchity i avtomatiki energosistem»* [Proceedings of the International Conference on Science and Technology of the International Council of Large Electric Systems (SIGRE) «Actual Trends in Development of Power System Protection and Automation»]. Saint-Petersburg, 2011.

9. Kiskachi, V.M. *Raschet minimal'nogo urovnya vysshikh garmonik pri odnofaznykh zamykaniyakh na zemlyu v setyakh s izolirovannoy i kompensirovannoy neytral'yu* [Calculation of minimum level of higher harmonics under single phase earth fault in ungrounded networks and networks with resonant grounding]. *Trudy VNIIE* [Collected works of the All-Union Electric Power Research Institute]. Moscow, Energiya, 1966, issue 26, pp. 89–105.

10. Zhezhelenko, I.V., Tolpygo, O.B. *Chuvstvitel'nost' signalizatsii zamykaniy na zemlyu s ispol'zovaniem vysshikh garmonik v setyakh promyshlennyykh predpriyatiy* [Earth fault

alarm sensitivity based on higher harmonics in industrial networks]. *Elektrichestvo*, 1969, no. 10, pp. 32–39.

11. Vinokurova, T.Yu., Shagurina, E.S., Shuin, V.A. *Matematicheskaya model' dlya otsenki minimal'nogo urovnya vysshikh garmonik v toke odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v kompensirovannykh setyakh 6–10 kV* [Mathematical model of higher harmonics minimum level evaluation in the current single-phase earth fault in 6–10 kV compensated networks]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 6, pp. 35–41.

12. Shagurina, E.S. *Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya v perekhodnykh rezhimakh ustroystv releyной zashchity na osnove vysshikh garmonik*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of operation efficiency in transient regimes of relay protection based on higher harmonics. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2012.

13. Ershevich, V.V., Zeyliger, A.N., Illarionov, G.A. *Spravochnik po proektirovaniyu elektroenergeticheskikh sistem* [Reference book on Electric Power Systems Design]. Moscow, Energoatomizdat, 1985.

14. Alekseev, V.G. *Tokovaya zashchita ZGNP-4.2 ot zamykaniy na zemlyu v obmotke statora generatora, rabotayushchego na sbornye shiny* [Current protection ZGNP-4.2 from earth faults in the stator winding of generators operating on busbars]. *Elektricheskie stantsii*, 2006, no. 2, pp. 51–56.

15. Vaynshteyn, V.L. *Issledovanie vysshikh garmonik toka zamykaniya na zemlyu* [Investigation of higher harmonics of the earth current]. *Promyshlennaya energetika*, 1986, no. 1, pp. 39–40.

16. Vagin, G.Ya., Loskutov, A.B., Sevost'yanov, A.A. *Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike* [Electromagnetic compatibility in electrical power engineering]. Moscow, Akademiya, 2011.

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

Добрягина Ольга Александровна,

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

Шагурина Елена Сергеевна,

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