

УДК 621.315.6

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.126626

ВЛИЯНИЕ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ НА ЧАСТОТУ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Троценко Е. А., Бржезицкий В. А., Проценко А. Р., Чумак В. В., Гаран Я. А.

Объектом исследования являются процессы частичного разряда, моделируемого при воздействии несинусоидального напряжения. В контексте исследования влияния гармоник напряжения на частичные разряды, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения может использоваться только для грубой оценки. Причина этого заключается в том, что коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения не учитывает фазовые углы отдельных гармонических составляющих напряжения. При несинусоидальном напряжении (с коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения 10 % и выше) интенсивность частичных разрядов в изоляции возрастает. Однако при меньших значениях коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения гармоники также могут влиять на характеристики частичных разрядов. Для решения поставленной задачи необходимо провести исследование, увеличив количество учитываемых гармоник напряжения. Для этого можно использовать известную трёх-емкостную схему замещения диэлектрика с газовым включением, внося соответствующие изменения в источник напряжения.

Проведено исследование модели с использованием совместно с гармоникой основной частоты, гармоник напряжения со 2-й по 30-ю включительно. Установлено, что при фиксированной амплитуде фазовый угол гармоник напряжения имеет решающее влияние на количество импульсов частичных разрядов. При наличии гармоник напряжения это количество может оказаться таким же, как и при воздействии идеального синусоидального напряжения. Также оно может оказаться на 14,3 % меньше и на 14,3 % или на 28,6 % больше. При этом во всех случаях коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения остается одним и тем же. Проведено экспериментальное исследование возможности использования высоковольтных эталонных индуктивных трансформаторов напряжения для измерения несинусоидальности напряжения. Установлено, что это целесообразно для области максимального значения магнитной проницаемости их магнитопроводов, что соответствует диапазону 80–120 % номинального напряжения трансформатора.

Мобильные лаборатории для поверки высоковольтных трансформаторов напряжения на местах их эксплуатации при дополнении соответствующей аппаратурой одновременно могут быть использованы для измерения ряда показателей качества электроэнергии.

Ключевые слова: схемотехническое моделирование, частичный разряд, гармоники напряжения, фазовый угол, частота следования импульсов.

1. Введение

Проблема гармоник тока и напряжения актуальна для электрических сетей различных классов напряжения. Несинусоидальные режимы в электрических сетях приводят к ряду негативных последствий, в том числе, к сокращению сроков службы изоляции. Длительная работа кабельных и воздушных линий электропередач, трансформаторов, генераторов, коммутационных аппаратов и других устройств зависит от надёжной работы электрической изоляции. В процессе эксплуатации на изоляцию воздействует рабочее напряжение и перенапряжения. Со временем характеристики изоляции ухудшаются, снижается сопротивление изоляции, возрастает значение тангенса угла диэлектрических потерь. В ослабленных участках изоляции возникают частичные разряды, которые являются одной из причин, вызывающих ускоренное старение изоляции. Гармоники тока и напряжения приводят к дополнительным потерям, нагреву и ускоренному старению электрической изоляции. Появление частичных разрядов определённого уровня в изоляции электрооборудования свидетельствует о внутренних дефектах этого оборудования. Поэтому измерение характеристик частичных разрядов нашло свое применение в диагностике состояния оборудования высокого напряжения. На определённом этапе исследования было отмечено влияние гармоник на явление частичного разряда. Изучение влияния гармоник напряжения на характеристики частичных разрядов показало, что при несинусоидальном напряжении (с коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения 10 % и выше) интенсивность частичных разрядов возрастает [1]. Допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения устанавливаются стандартами, в частности, ГОСТ 13109, IEC 61000-4-7. Эти значения отличаются для различных номинальных напряжений. Например, при номинальном напряжении 6–20 кВ предельно допустимое значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения составляет 8 % (ГОСТ 13109). Как будет показано далее, авторы работы считают, что и при таких значениях коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения гармоники могут существенно влиять на характеристики частичных разрядов.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования являются процессы частичного разряда, моделируемого при использовании ёмкостной схемы замещения диэлектрика с газовым включением при воздействии несинусоидального напряжения. Согласно ГОСТ 13109, несинусоидальность напряжения характеризуется двумя следующими показателями. Первый – это коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, который определяется по формуле (1). Второй – это коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения, который определяется по формуле (2).

$$THD_U = \sqrt{\sum_{n=2}^N \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_N^2}}{U_1}, \quad (1)$$

где U_n – среднеквадратическое значение n -ой гармонической составляющей напряжения, В; n – порядок гармонической составляющей напряжения; N – порядок последней из учитываемых гармонических составляющих напряжения; U_1 – среднеквадратическое значение напряжения основной частоты (первой гармоники), В.

Согласно ГОСТ 13109 или IEC 61000-4-7, обычно принимают $N = 40$, однако в ряде публикаций ограничиваются $N = 25$ (ДСТУ EN 50160), поскольку некоторые цифровые анализаторы измеряют гармоники только до 25-го порядка для расчета коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения. В связи с этим в данной работе принято $N = 30$.

$$U_n (\%) = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Допустимые значения коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения (2) для электрических сетей различного номинального напряжения приведены в ГОСТ 13109.

В контексте исследования влияния гармоник напряжения на частичные разряды, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (1) может использоваться только для грубой оценки [2]. Причина этого заключается в том, что коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (1) не учитывает фазовые углы отдельных гармонических составляющих напряжения [2]. В [3] показаны два примера зависимости количества импульсов частичных разрядов от фазового угла 5-й гармоники напряжения. В первом случае, в газовом включении возникает такое же количество частичных разрядов за период, как и при строго синусоидальном напряжении, но во втором количество частичных разрядов больше. При этом коэффициент 5-ой гармонической составляющей напряжения в обоих случаях одинаковый (4 %) и, соответственно, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения является неизменным.

Естественно, при возрастании амплитуды гармоник указанный эффект должен проявляться сильнее. Исследования влияния гармоник напряжения достаточно большой амплитуды на характеристики частичных разрядов проведены в [1, 2]. Авторы данной работы считают, что необходимо также провести исследование влияния гармоник напряжения на количество частичных разрядов, при таких амплитудах гармоник, которые не превышают допустимых значений согласно ГОСТ 13109.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является анализ зависимости частоты следования импульсов частичных разрядов в изоляции при воздействии совместно с первой гармоникой гармоник напряжения со 2-й по 30-ю в программах схемотехнического моделирования. При этом под частотой следования импульсов частичных разрядов будем иметь в виду число импульсов частичных разрядов за период, умноженное на частоту сети. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Выбор модели диэлектрика с газовым включением при частичном разряде и определение количества частичных разрядов за период при воздействии строго синусоидального напряжения частоты 50 Гц.

2. Определение частичных разрядов при воздействии совместно с гармоникой основной частоты также гармоник напряжения со 2-й по 30-ю.

3. Экспериментальное исследование возможности использования эталонных индуктивных трансформаторов напряжения для измерения показателей качества электрической энергии, в том числе и несинусоидальности напряжения.

4. Формулирование рекомендаций и выводов по практическому определению показателей несинусоидальности напряжения в сетях высокого напряжения.

4. Исследование существующих решений проблемы

Для исследования частичных разрядов при напряжении переменного тока в большинстве случаев применяется трёх-емкостная схема замещения диэлектрика с газовым включением. Данная схема является результатом усовершенствований схемы, предложенной в [4]. Краткая история ряда внесённых в схему изменений дана в [5]. В [6] также предложено одно из последних усовершенствований схемы для случая воздействия импульсного напряжения на бумажно-масляную изоляцию с частичным разрядом. В целом, хорошую применимость трёх-емкостной схемы замещения диэлектрика с газовым включением при воздействии напряжения переменного тока подтверждают работы [7–9]. Влияние гармоник напряжения на характеристики частичных разрядов, главным образом на увеличение их интенсивности показано в [1, 2, 10]. Воздействующее напряжение в [1, 2] представляло напряжение основной частоты (первой гармоники) и несколько гармоник высшего порядка. Исследования проводились при нескольких фиксированных значениях фазового угла гармоник высшего порядка. Пример совместного влияния 1-й и 5-й гармоники напряжения на изменение количества частичных разрядов за период показан в работе [3]. При этом коэффициент 5-ой гармонической составляющей напряжения (4 %) не превышает допустимого значения согласно ГОСТ 13109. В данной работе авторы предлагают провести исследование, увеличив количество гармоник напряжения, учитываемых совместно с гармоникой основной частоты, со 2-й по 30-ю. При этом в исследовании можно использовать ту же модель диэлектрика с газовым

включением, что и в работе [3], внося соответствующие изменения в источник напряжения.

5. Методы исследований

Для решения поставленных задач были использованы методы: многовариантного анализа, схемотехнического моделирования на персональном компьютере, испытания высоким напряжением в высоковольтной лаборатории. Исходным материалом исследований является ёмкостная схема замещения диэлектрика с газовым включением при частичном разряде.

6. Результаты исследований

Модель для исследования влияния гармоник напряжения на частичные разряды в газовом включении показана на рис. 1. Эта модель предложена в работе [3]. Моделирование выполнено в демонстрационной версии Micro-Cap Evaluation/Student Version [11].

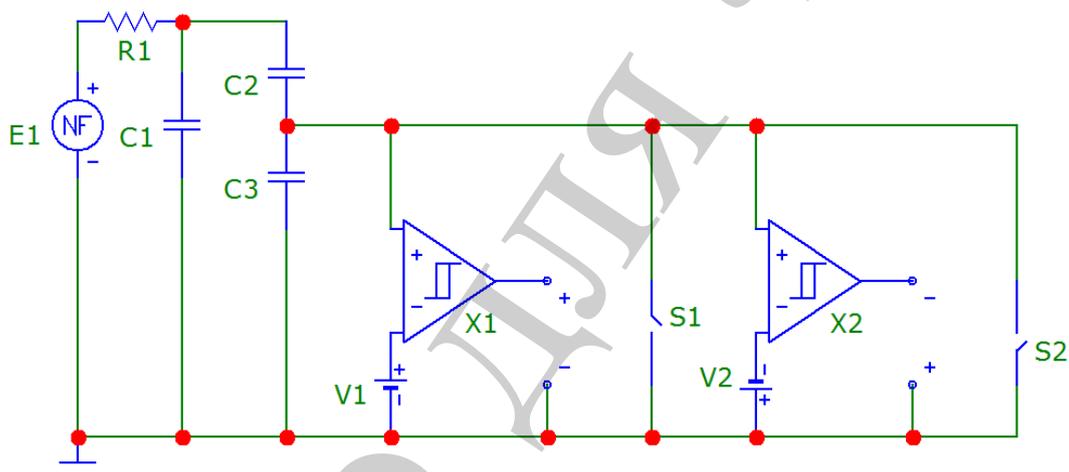


Рис. 1. Используемая схемотехническая модель диэлектрика с газовым включением при частичном разряде, аналогичная работе [3]

На рис. 1 E_1 – функциональный источник напряжения (может представлять функции как источника напряжения только основной частоты, так и алгебраической суммы гармоник напряжения);

R_1 – внутреннее сопротивление источника напряжения;

C_1 – ёмкость диэлектрика, без участка с газовым включением;

C_2 – ёмкость участка диэлектрика, включенного последовательно с газовым включением;

C_3 – ёмкость газового включения. Остальные элементы модели представляют собой разрядник, имитирующий пробой газового включения.

К этим элементам относятся:

X_1, X_2 – компараторы напряжения с гистерезисом;

S_1, S_2 – ключи, управляемые напряжением с гистерезисом;

V_1, V_2 – источники опорного напряжения. Сопротивление ключей S_1 и S_2 в разомкнутом состоянии составляет 100 МОм, а в замкнутом 1 Ом. Внутреннее сопротивление источника напряжения составляет 1 Ом. В работе принято, что $C_1 = 5000$ пФ; $C_2 = 200$ пФ и $C_3 = 600$ пФ [3]. Характеристики газового включения являются следующими: пробивное напряжение частичного разряда (+800 В) и напряжение погасания частичного разряда (+400 В). Соответственно, для отрицательного полупериода напряжения эти значения составляют –800 В и –400 В. В работе принято, что амплитуда основной гармоники напряжения составляет $U_{1m} = 10000 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3}$ В.

Перед исследованием влияния несинусоидального напряжения на модель изоляции с газовым включением было проведено тестирование модели с использованием неискажённого синусоидального напряжения, результаты которого показаны на рис. 2. Результаты показаны на одном графике, но с разными масштабами по вертикальной оси. Здесь и далее синим цветом показаны кривые напряжения, приложенного к диэлектрику. Красным цветом показаны кривые напряжения на газовом включении в твердой изоляции.

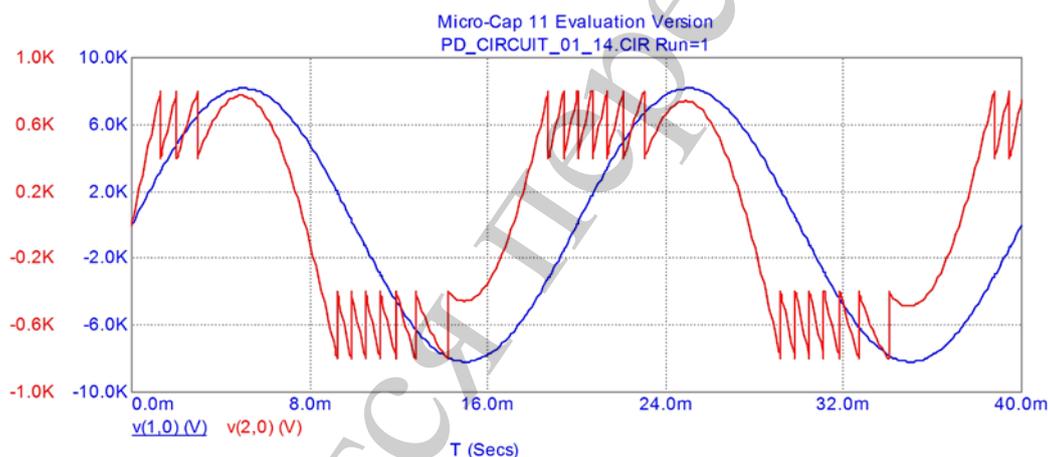


Рис. 2. Возникновение 14 частичных разрядов за период при идеальном синусоидальном напряжении частоты 50 Гц

Таким образом, было определено, что при отсутствии гармонических искажений при заданных параметрах модели в газовом включении возникает 14 импульсов частичных разрядов за один период частоты 50 Гц. Все дальнейшие результаты будут сравниваться с этим числом.

Для варьирования значения фазового угла (φ_n) напряжения $u_n(t)$ каждой n -й гармоники:

$$u_n(t) = U_{1m} \cdot \left(\frac{U_n}{U_1} \right) \cdot \sin(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_n),$$

где $f = 50$ Гц, было предложено использовать генератор случайных чисел. Соответственно, фазовый угол каждой гармоники задавался формулой:

$$\varphi_n = 2 \cdot \pi \cdot RNDR, \quad (3)$$

где φ_n – фазовый угол в радианах; $RNDR$ – функция, которая возвращает случайное действительное число в диапазоне от 0 до 1 при каждом запуске анализа переходных процессов [11]. Таким образом, при каждом запуске анализа переходных процессов фазовый угол каждой отдельной гармоники напряжения представляет собой случайное число в диапазоне от 0 до $2 \cdot \pi$. После многократного запуска анализа переходных процессов были определены все возможные варианты количества импульсов частичных разрядов, которые могут возникать за период в данной модели. Эти значения составляют 12, 14, 16 или 18 импульсов частичных разрядов (ч.р.) за один период. Примеры показаны на рис. 3–6. Подсчёт начинается со второго полупериода, когда в каждом последующем периоде приложенного напряжения содержится одинаковое количество импульсов частичных разрядов.

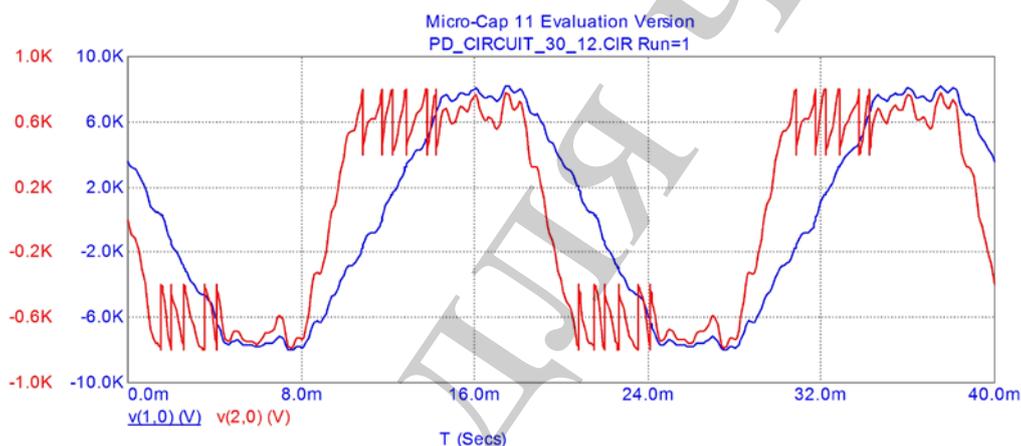


Рис. 3. Возникновение 12 частичных разрядов за период при заданных значениях амплитуд и сочетании фазовых углов гармоник напряжения в соответствии с табл. 1

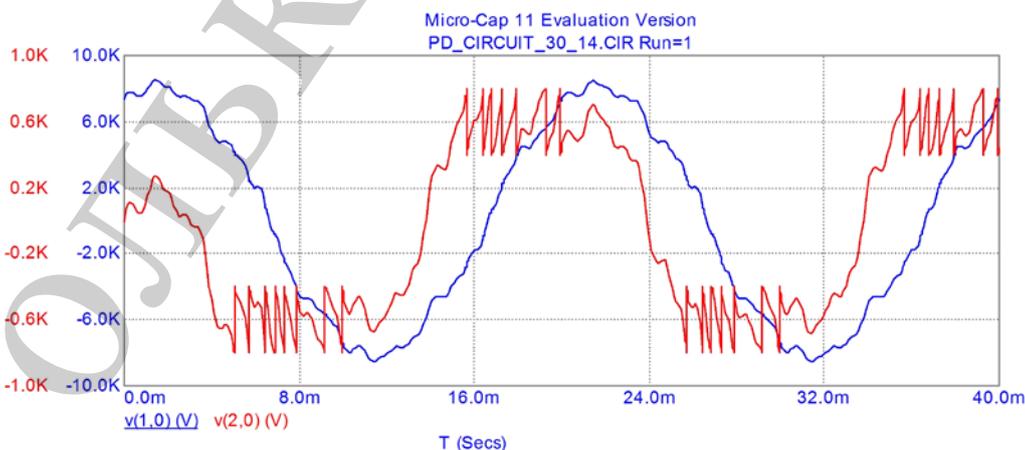


Рис. 4. Возникновение 14 частичных разрядов за период при заданных значениях амплитуд и сочетании фазовых углов гармоник напряжения в соответствии с табл. 1

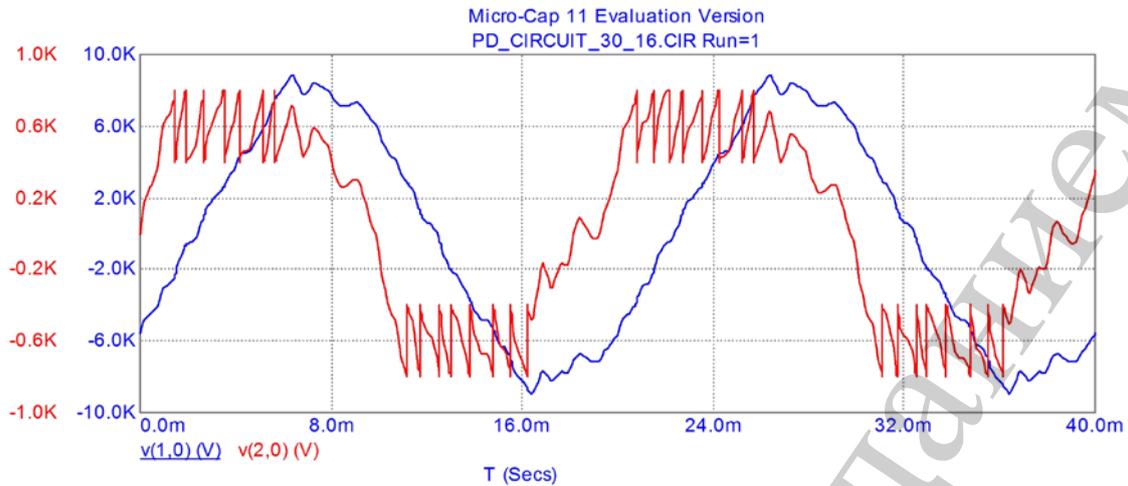


Рис. 5. Возникновение 16 частичных разрядов за период при заданных значениях амплитуд и сочетании фазовых углов гармоник напряжения в соответствии с табл. 1

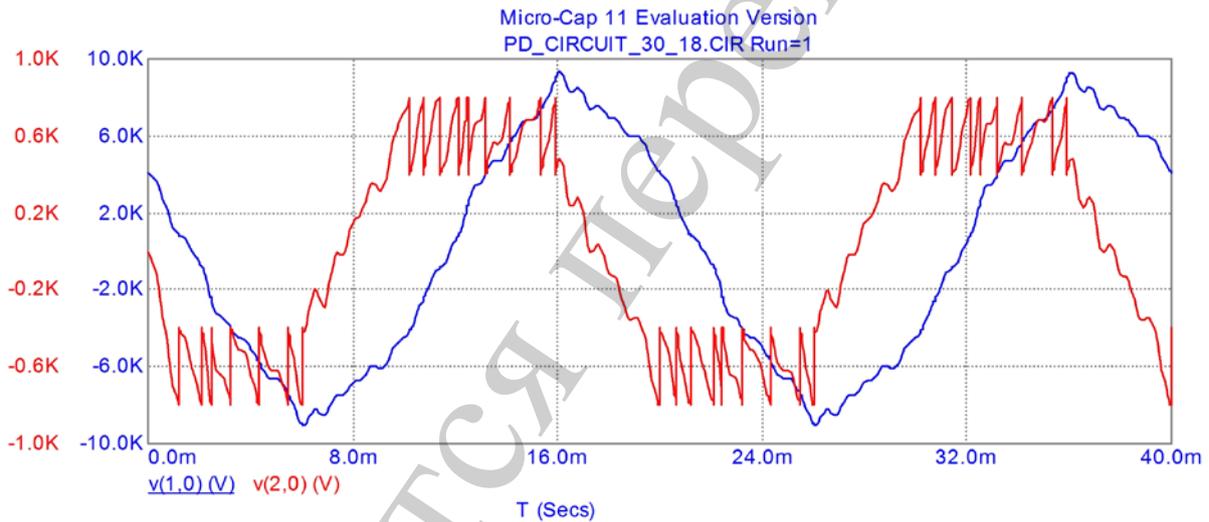


Рис. 6. Возникновение 18 частичных разрядов за период при заданных значениях амплитуд и сочетании фазовых углов гармоник напряжения в соответствии с табл. 1

Фазовый угол и коэффициент $U_n(\%)$ каждой n -ой гармонической составляющей напряжения, которые соответствуют графикам на рис. 3–6, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты моделирования

Номер n -ой гармонической составляющей напряжения	Коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения, %	Фазовый угол φ_n n -ой гармонической составляющей напряжения, рад			
		12 ч. р. за период (рис. 3)	14 ч. р. за период (рис. 4)	16 ч. р. за период (рис. 5)	18 ч. р. за период (рис. 6)
1	100.00	2.664	1.075	5.554	2.621
2	1.50	2.670	5.161	2.179	4.462
3	1.50	1.480	2.642	1.969	6.207
4	0.70	1.619	1.368	4.721	2.981
5	4.00	4.065	5.099	4.474	1.158
6	0.30	1.002	1.669	4.027	4.152
7	3.00	5.915	0.742	0.120	3.572
8	0.30	0.339	4.095	0.617	5.440
9	0.50	3.701	0.441	3.726	1.981
10	0.30	0.766	2.388	1.820	1.492
11	2.00	2.121	2.431	0.176	1.731
12	0.20	0.397	1.012	4.502	2.497
13	2.00	5.157	0.910	1.730	5.486
14	0.20	0.556	4.405	1.382	4.844
15	0.30	0.848	4.576	3.405	0.348
16	0.20	3.360	2.541	3.461	5.717
17	1.50	5.966	0.416	4.842	5.003
18	0.20	4.200	3.878	2.248	3.567
19	1.00	4.457	0.216	2.507	0.784
20	0.20	1.451	0.221	4.653	5.328
21	0.20	3.269	2.438	1.276	6.076
22	0.20	1.440	2.672	1.300	5.207
23	1.00	2.834	0.267	6.041	5.255
24	0.20	0.011	2.881	0.487	4.947
25	1.00	2.625	3.407	0.362	1.626
26	0.20	1.980	2.437	1.421	3.982
27	0.94	3.982	4.943	3.823	2.207
28	0.20	5.065	3.800	4.119	3.394
29	0.88	5.818	0.892	5.415	5.294
30	0.20	0.578	5.977	5.736	0.916

Отметим, что в проведенном исследовании значения коэффициентов n -ой гармонической составляющей напряжения (табл. 1) приняты равными допустимым значениям, согласно ГОСТ 13109. Анализ графиков на рис. 2–6 показывает, что при фиксированной амплитуде фазовый угол гармоник напряжения оказывает решающее влияние на количество импульсов частичных разрядов в газовой полости. При наличии гармоник напряжения это количество может оказаться таким же, как и при воздействии идеального синусоидального напряжения (14 частичных разрядов за период). Также оно может оказаться на 14,3 % меньше (12 частичных разрядов за период) и на 14,3 % или 28,6 % больше (соответственно, 16 или 18 частичных разрядов за период). При этом

для всех этих случаев расчёт коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения по формуле (1) даёт одно и то же значение $THD_U = 6.78 \%$.

Полученные результаты имеют важное значение для теории частичных разрядов в электрооборудовании высокого напряжения. Не сразу, но постепенно частичные разряды приводят к ухудшению свойств изоляции, её физическому разрушению и, в конечном итоге, к электрическому пробое. Возрастание интенсивности частичных разрядов при ухудшении показателей качества электроэнергии способствует ускорению этого процесса.

В связи с полученными выше результатами становится важной необходимость измерения показателей качества электроэнергии в сетях высокого напряжения не только по амплитудным, но и по фазовым характеристикам. Системы контроля качества электроэнергии кроме самих специализированных измерителей показателей качества электроэнергии (цифровых амплитудно-фазовых анализаторов) требуют также использования соответствующих первичных масштабных преобразователей тока и напряжения.

Авторами было проведено исследование возможности использования эталонных индуктивных трансформаторов напряжения для измерения показателей качества электрической энергии, в частности, несинусоидальности напряжения. Принципиальная схема установки показана на рис. 7. Метод измерения заключался в сравнении выходных напряжений исследуемого эталонного тороидального трансформатора напряжения с эталонным ёмкостным делителем напряжения.

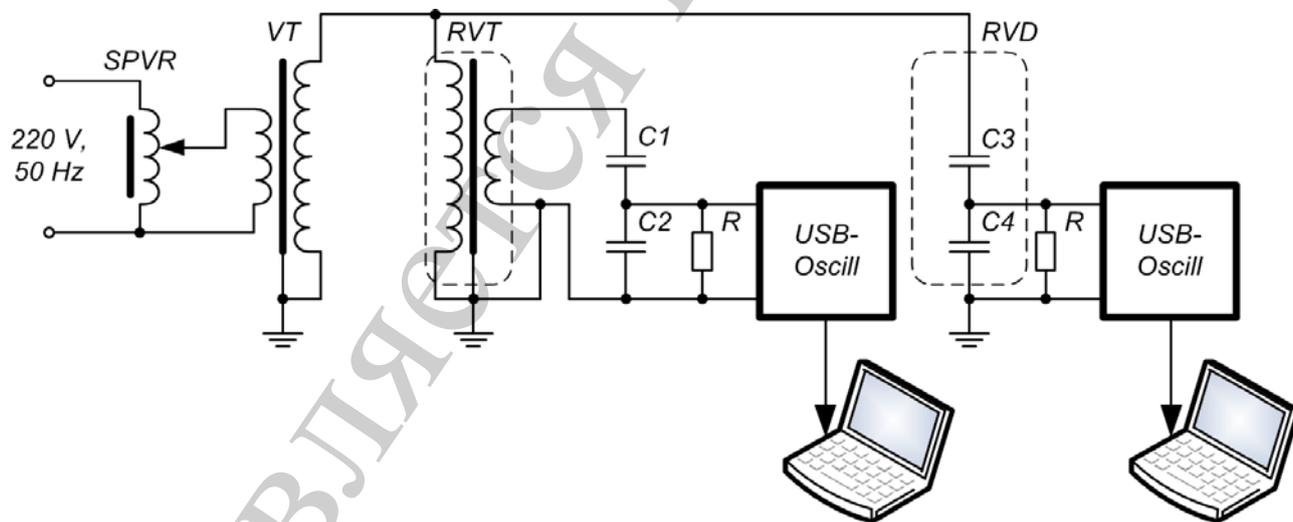


Рис. 7. Принципиальная схема установки для исследования частотных характеристик индуктивного трансформатора напряжения

На рис. 7 *SPVR* – однофазный регулятор напряжения; *VT* – повышающий трансформатор напряжения; *RVT* – исследуемый эталонный тороидальный индуктивный трансформатор напряжения; *RVD* – эталонный делитель напряжения; *USB-Oscill* – цифровой осциллограф.

Установка, представленная на рис. 7, позволяет подавать на вход исследуемого трансформатора напряжения синусоидальный сигнал основной

частоты (с некоторыми искажениями, существующими в сети и привносимыми регулятором напряжения и повышающим трансформатором напряжения).

В установке в качестве исследуемого трансформатора напряжения использовался индуктивный эталонный тороидальный трансформатор напряжения класса 110 кВ класса точности 0,05. Трансформатор изготовлен на кафедре техники и электрофизики высоких напряжений Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского» [12]. Фотография трансформатора представлена на рис. 8, а. Параметры эталонного емкостного делителя напряжения следующие. Ёмкость высоковольтного плеча $C_3 = 75$ пФ (высоковольтный измерительный конденсатор типа MCF-75/350, производства Германии). Ёмкость низковольтного плеча $C_4 = 0.87$ мкФ (магазин ёмкости типа P-5025, производства Украины).

Для наблюдения результатов измерения на экране ноутбука использовался цифровой осциллограф USB-Oscill (производства Украины) с функцией спектрального анализа сигнала напряжения до 25 гармоники включительно, с входным сопротивлением $R = 1$ МОм. Для снижения амплитуды сигнала с выводов обмотки низкого напряжения трансформатора RVT применялся емкостной делитель напряжения с емкостями $C_1 = 0.1111$ мкФ и $C_2 = 0.9999$ мкФ (магазины ёмкости типа P-5025).

Конденсаторы C_3 , C_4 вместе с входным сопротивлением R осциллографа USB-Oscill образуют ёмкостно-омический делитель напряжения с коэффициентом деления K , зависым от угловой частоты ω :

$$K(\omega) = \sqrt{1 + \frac{C_4^2}{C_3^2} + \frac{2C_4}{C_3} + \frac{1}{C_3^2 R^2 \omega^2}} = \sqrt{1.346 \cdot 10^8 + \frac{1.778 \cdot 10^8}{\omega^2}}.$$

Благодаря большому сопротивлению R , коэффициент деления $K(\omega)$ практически не зависит от угловой частоты ω , то есть вышеупомянутый емкостно-омический делитель напряжения не является фильтром гармонических составляющих напряжения. Например, при частотах основной (1-й) и 40-й гармоники (соответственно, при $\omega_1 = 314.159$ рад/с и $\omega_{40} = 12566.4$ рад/с), $K(\omega)$ соответственно составляет, $K(\omega_1) = 11601.80$ $K(\omega_{40}) = 11601.72$.



а



б

Рис. 8. Индуктивный эталонный тороидальный трансформатор напряжения класса 110 кВ: *а* – подготовка трансформатора к испытаниям в лабораторном зале; *б* – трансформатор, смонтированный внутри мобильной поверочной лаборатории [13]

Исследования проводились при 20 %, 50 %, 80 %, 100 % и 120 % от номинального напряжения эталонного индуктивного трансформатора напряжения $U_r = 110 / \sqrt{3} = 63.5$ кВ (среднеквадратическое значение напряжения). Результаты экспериментального исследования трансформации высших гармонических составляющих напряжения высоковольтным эталонным трансформатором напряжения в широком диапазоне его первичного напряжения показаны на рис. 9–13. Видно, что трансформация приближается к эталонному высоковольтному делителю напряжения в области максимального значения магнитной проницаемости магнитопровода трансформатора, то есть при 80–120 % от номинального напряжения (рис. 11–13).

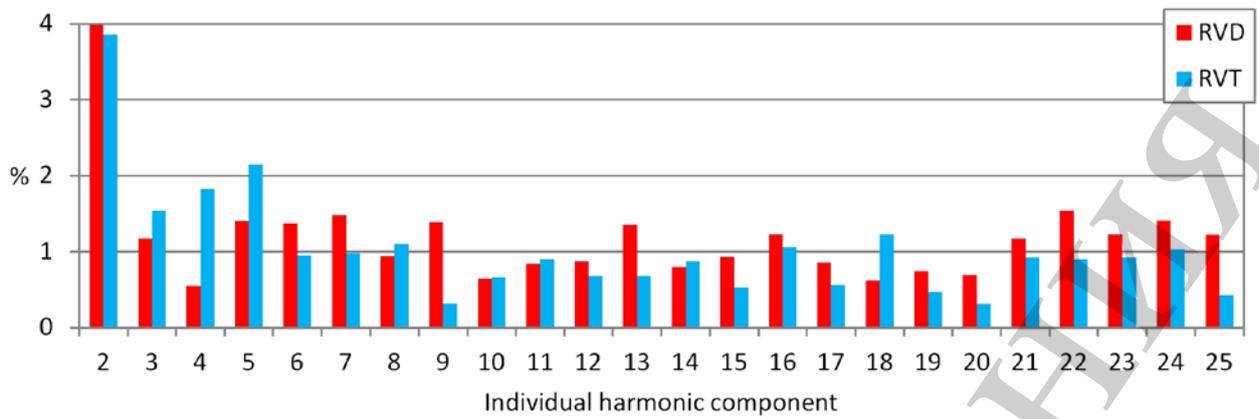


Рис. 9. Гистограммы коэффициентов n -й гармонической составляющей испытательного напряжения при 20 % от U_r

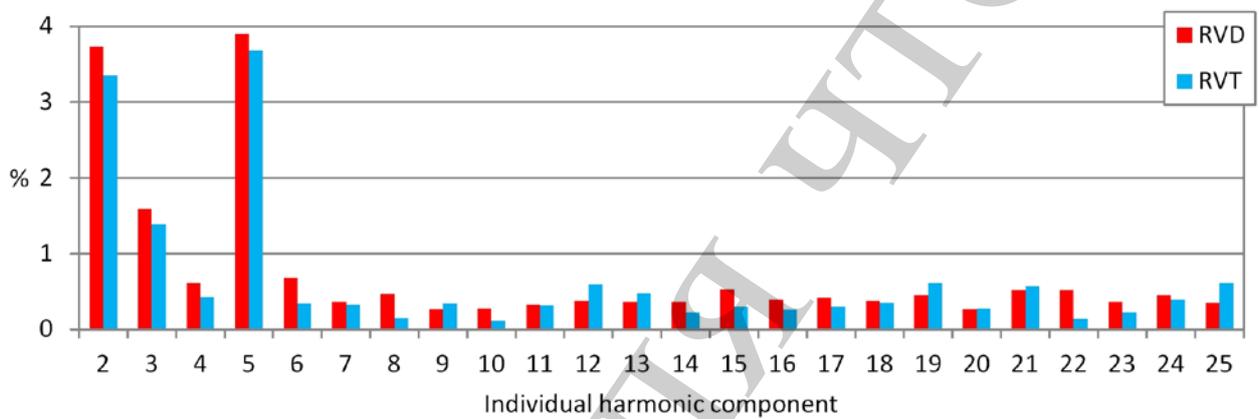


Рис. 10. Гистограммы коэффициентов n -й гармонической составляющей испытательного напряжения при 50 % от U_r

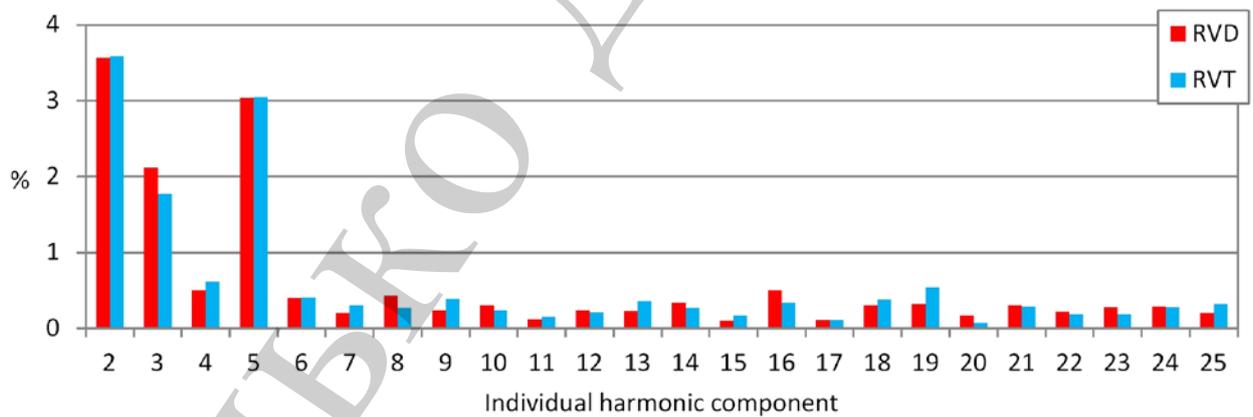


Рис. 11. Гистограммы коэффициентов n -й гармонической составляющей испытательного напряжения при 80 % от U_r

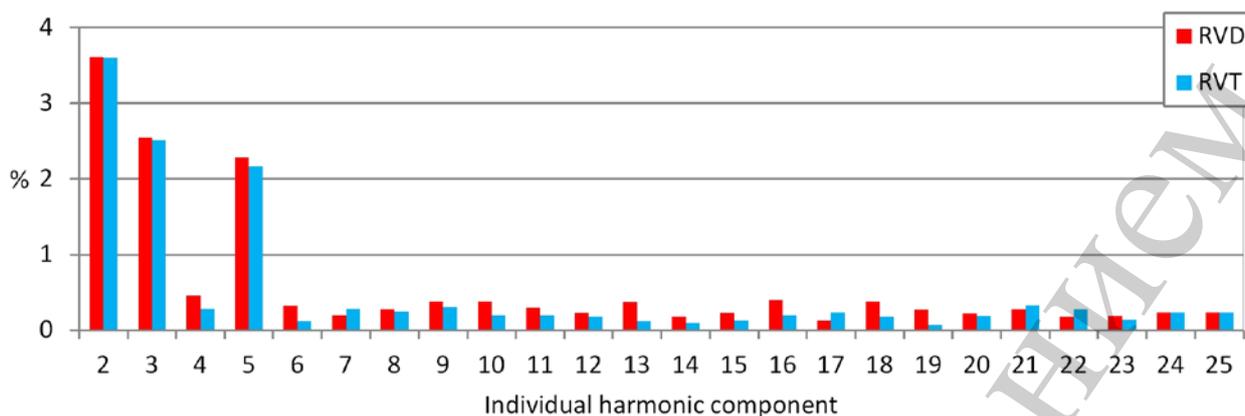


Рис. 12. Гистограммы коэффициентов n -й гармонической составляющей испытательного напряжения при 100 % от U_r

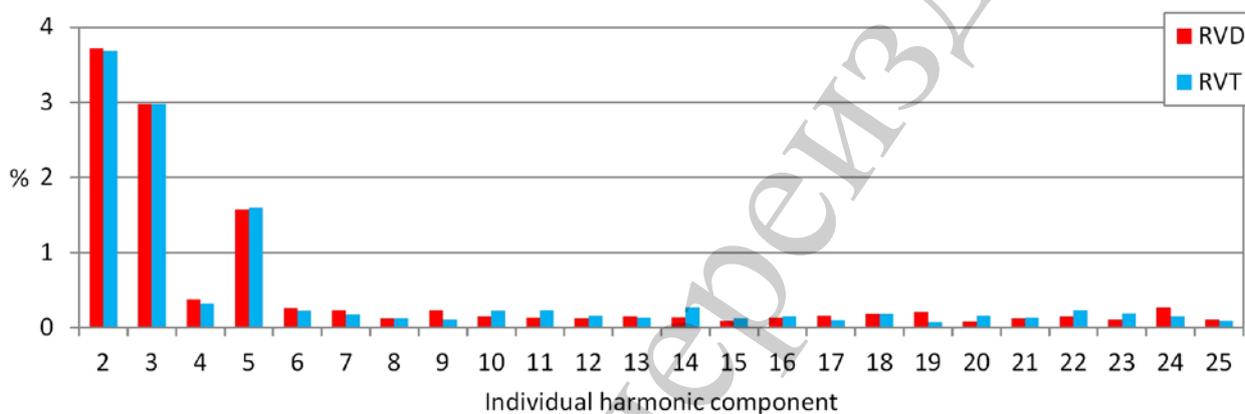


Рис. 13. Гистограммы коэффициентов n -й гармонической составляющей испытательного напряжения при 120 % от U_r

На рис. 9–13 *RVD* – гистограммы для эталонного делителя напряжения; *RVT* – гистограммы для исследуемого эталонного тороидального индуктивного трансформатора напряжения.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность использования эталонных измерительных трансформаторов напряжения для измерения показателей качества электроэнергии, в частности, высших гармонических составляющих высокого напряжения. Вместе с тем, в работе [14] показано, что серийные (не эталонные) трансформаторы напряжения, используемые в высоковольтных электрических сетях, неудовлетворительно преобразовывают высшие гармонические составляющие напряжения в режимах, связанных с насыщением их магнитопроводов.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Сильными сторонами данного исследования являются:

- в отличие от других исследований, предложенный подход учитывает вместе с гармоникой основной частоты, все гармоники со 2-й по 30-ю включительно;

– возможность точно определить все возможные варианты количества импульсов частичных разрядов, которые могут возникать в каждой конкретной модели диэлектрика с газовым включением. Получить подобный результат в физическом эксперименте, учитывая столь большое количество гармоник напряжения очень затруднительно и, практически, маловероятно;

– экспериментально подтверждена возможность использования эталонных индуктивных трансформаторов напряжения для измерения амплитуды гармоник напряжения непосредственно в сетях высокого напряжения.

Weaknesses. Слабые стороны данного исследования состоят в том, что:

– влияние эталонных индуктивных трансформаторов напряжения на фазовый сдвиг гармоник напряжения не было исследовано. Для этого необходимы цифровые анализаторы, соответственно с функцией измерения не только амплитуды, но и фазовых характеристик отдельных гармоник;

– измерения амплитуды гармоник напряжения выполнены до 25-й гармоники включительно. В то время как в стандартах число гармоник, которые необходимо измерять, составляет 40. Как и в предыдущем пункте, причина заключается в ограниченных возможностях цифровых анализаторов.

Opportunities. К дополнительным возможностям, которые предоставляет данное исследование, относится:

– возможность дальнейшего исследования влияния гармоник напряжения на характеристики частичных разрядов и выявление отдельных «критических» гармоник по отношению к возрастанию интенсивности частичных разрядов;

– продолжение работ по усовершенствованию эталонных индуктивных трансформаторов напряжения для измерения показателей качества электрической энергии, в том числе и несинусоидальности напряжения.

Threats. Частичный разряд это очень сложное физическое явление, поэтому моделирование сопровождается определёнными допущениями и упрощениями. На практике, пробивное напряжение частичного разряда и напряжение погасания частичного разряда в каждом отдельном разряде могут быть различными. В работе при исследовании частичного разряда эти параметры принимались неизменными. По этой и по другим причинам, количественные характеристики результата, полученного при моделировании, могут, в некоторой степени, отличаться от определённого в эксперименте.

8. Выводы

1. Для исследования частичных разрядов при воздействии несинусоидального напряжения выбрана традиционная трёх-емкостная схема замещения диэлектрика с газовым включением. Проведено исследование модели с использованием неискажённого синусоидального напряжения. Установлено, что при отсутствии гармонических искажений при заданных параметрах модели и номинальном напряжении $10/\sqrt{3}$ кВ в газовом включении возникает 14 импульсов частичных разрядов за один период частоты 50 Гц.

2. Проведено исследование модели с использованием совместно с гармоникой основной частоты, гармоник напряжения со 2-й по 30-ю включительно. Установлено, что при фиксированной амплитуде фазовый угол гармоник напряжения имеет решающее влияние на количество импульсов частичных разрядов. При наличии гармоник напряжения это количество может оказаться таким же, как и при воздействии идеального синусоидального напряжения (14 частичных разрядов за период). Также оно может оказаться на 14,3 % меньше (12 частичных разрядов за период) и на 14,3 % или 28,6 % больше (соответственно, 16 или 18 частичных разрядов за период). При этом во всех случаях коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения остается одним и тем же. Таким образом, в контексте исследования влияния гармоник напряжения на частичные разряды, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения может использоваться только для грубой оценки, поскольку не учитывает фазовые характеристики отдельных гармоник напряжения.

3. Было проведено исследование возможности использования высоковольтных эталонных индуктивных трансформаторов напряжения для измерения показателей качества электрической энергии, в частности, несинусоидальности напряжения. В результате было установлено, что это целесообразно для области максимального значения магнитной проницаемости их магнитопроводов, что соответствует диапазону 80–120 % номинального напряжения трансформатора.

4. Работы по усовершенствованию эталонных индуктивных трансформаторов напряжения для измерения несинусоидальности напряжения являются перспективными. Кроме того, необходимы цифровые анализаторы с функцией измерения не только амплитудных, но и фазовых характеристик отдельных гармоник напряжения. В связи с этим мобильные лаборатории для проверки высоковольтных трансформаторов напряжения (рис. 8, б) на местах их эксплуатации [13, 15] при их дополнении соответствующей аппаратурой одновременно могут быть использованы для измерения ряда показателей качества электроэнергии.

References

1. Florkowski M., Florkowska B. Distortion of partial-discharge images caused by high-voltage harmonics // IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution. 2006. Vol. 153, No. 2. P. 171–180. doi:[10.1049/ip-gtd:20050008](https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20050008)
2. Impact of high voltage harmonics on interpretation of partial discharge patterns / Florkowski M. et al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. Vol. 20, No. 6. P. 2009–2016. doi:[10.1109/tdci.2013.6678848](https://doi.org/10.1109/tdci.2013.6678848)
3. Trotsenko Ye. et al. Simulation of partial discharges under influence of impulse voltage // Technology Audit and Production Reserves. 2018. Vol. 1, No. 1 (39). P. 36–41. doi:[10.15587/2312-8372.2018.123309](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.123309)
4. Gemant A., Philippoff W. Die Funkenstrecke mit Vorkondensator // Zeitschrift für Technische Physik. 1932. Vol. 13, No. 9. P. 425–430.

5. Lemke E. A critical review of partial-discharge models // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2012. Vol. 28, No. 6. P. 11–16. doi:[10.1109/mei.2012.6340519](https://doi.org/10.1109/mei.2012.6340519)
6. Partial discharge characteristics of uniform gap in oil-impregnated paper insulation under switching impulse voltage / Deng J. et al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2016. Vol. 23, No. 6. P. 3584–3592. doi:[10.1109/tdei.2016.005508](https://doi.org/10.1109/tdei.2016.005508)
7. A Matlab Simulink model for a partial discharge measuring system / Gunawardana S. D. M. S. et al. // Electrical Engineering Conference. 2015. P. 29–34.
8. Arief Y. Z., Izzati W. A., Adzis Z. Modeling of Partial Discharge Mechanisms in Solid Dielectric Material // International Journal of Engineering and Innovative Technology. 2012. Vol. 1, No. 4. P. 315–320.
9. Patel U. D., Patel J. A., Patel H. R. Simulation and mathematical analysis of partial discharge measurement in transformer // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2015. Vol. 5, No. 1. P. 585–592.
10. Florkowska B., Florkowski M., Zydron P. The Role of Harmonic Components on Partial Discharge Mechanism and Degradation Processes in Epoxy Resin Insulation // IEEE International Conference on Solid Dielectrics. 2007. P. 560–563. doi:[10.1109/icسد.2007.4290875](https://doi.org/10.1109/icسد.2007.4290875)
11. Micro-Cap 11. Electronic Circuit Analysis Program. Reference Manual. Sunnyvale: Spectrum Software, 2014. 1040 p. URL: <http://www.spectrum-soft.com/download/rm11.pdf>
12. Brzhezytskyi V. O., Brzhezytskyi V. V., Voloshchenko V. V., Kikalo V. M., Masliuchenko I. M., Trotsenko Ye. O. Etalonnii vysokovoltnyi transformator napruhy toroidalnoho typu: proceedings // Metrolohichne zabezpechennia obliku elektrychnoi enerhii v Ukraini. Kyiv: AVEHA, 2007. P. 96.
13. Mobilna povirochna laboratoriiia klasiv napruhy 0,22...110 kV / Brzhezytskyi V. O. et al. // Metrolohichne zabezpechennia obliku elektrychnoi enerhii v Ukraini. Kyiv: AVEHA, 2007. P. 202–204.
14. Brzhezytski V. O., Garan Y. O., Maslychenko I. M. Transforming the higher harmonic components of the electromagnetic transformers (experimental study) // Scientific Works of National University of Food Technology. 2013. Vol. 49. P. 98–103.
15. Application of high voltage dividers for power quality indices measurement / Anokhin Y. L. et al. // Electrical Engineering & Electromechanics. 2017. No. 6. P. 53–59. doi:[10.20998/2074-272x.2017.6.08](https://doi.org/10.20998/2074-272x.2017.6.08)