

УДК 621.314.228

doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.08

А.Г. Гурин, И.А. Костюков

ВЛИЯНИЕ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ПАРАМЕТРЫ ФОРМИРУЕМЫХ НА ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКЕ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Мета. Аналіз впливу активного опору первинної та вторинної обмоток імпульсного трансформатору на напругу на навантажувальній ємності на основі розробленої методики аналізу перехідних процесів, що обумовлені розрядом накопичувальної ємності в первинній обмотці. *Методика.* Модель для розрахунку перехідних процесів розроблена із використанням перетворення Лапласа. Моделювання перехідних процесів проведено в програмному пакеті MATLAB. Результати розрахунку перехідних процесів порівняно із експериментальними результатами. *Результати.* Розроблено методику розрахунку перехідних процесів у випробувальних установках з імпульсними трансформаторами, що дає можливість враховувати втрати потужності в первинній та вторинній обмотках на напругу на навантажувальній ємності. Отримані розрахункові співвідношення, що дозволяють враховувати вплив активного опору первинної та вторинної обмоток трансформатору на напругу на навантажувальній ємності, струми у первинній та вторинній обмотках трансформатору, а також на напругу на індуктивності первинної обмотки трансформатору. *Наукова новизна.* Розроблена математична модель для розрахунку перехідних процесів в первинній та вторинній обмотках трансформатору із врахуванням впливу активного опору обмоток при його зміні в широкому діапазоні можливих значень. *Практичне значення.* Використання розробленої методики дозволяє визначати параметри розрядного кола, при яких на навантажувальній ємності відбувається формування імпульсів напруги без зміни форми фронту імпульсу. Бібл. 14, рис. 5.

Ключові слова: імпульсний трансформатор, ємнісне навантаження, активний опір обмоток, імпульс випробувальної напруги, випробування електричної ізоляції.

Цель. Анализ влияния активного сопротивления первичной и вторичной обмоток импульсного трансформатора на напряжение на нагрузочной емкости на основании разработанной методики анализа переходных процессов, вызванных разрядом накопительной емкости в первичной обмотке. *Методика.* Модель для расчета переходных процессов разработана с применением преобразования Лапласа. Моделирование переходных процессов проводилось в программном пакете MATLAB. Результаты расчетов переходных процессов сравнивались с экспериментальными результатами. *Результаты.* Разработана методика расчета переходных процессов в испытательных установках с импульсными трансформаторами, позволяющая учитывать влияние потерь мощности в первичной и вторичной обмотках на напряжение на нагрузочной емкости. Получены расчетные соотношения, позволяющие учитывать влияние активного сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора на напряжение на нагрузочной емкости, токи в первичной и вторичной обмотках трансформатора, а также на падение напряжения на индуктивности первичной обмотки трансформатора. *Научная новизна.* Разработана математическая модель для расчета переходных процессов в первичной и вторичной обмотках импульсного трансформатора с учетом влияния активного сопротивления обмоток при его изменении в широком диапазоне возможных значений. *Практическое значение.* Использование предложенной методики позволяет определять параметры разрядной цепи, при которых на нагрузочной емкости происходит формирование тестовых импульсов напряжения без искажений формы фронта импульсов. Библ. 14, рис. 5.

Ключевые слова: импульсный трансформатор, емкостная нагрузка, активное сопротивление обмоток, импульс испытательного напряжения, испытания электрической изоляции.

Введение. Проблема контроля устойчивости изоляции электроэнергетического оборудования по отношению к вызванным различными причинами перенапряжениям обычно решается путем применения генераторов импульсных напряжений. Такие генераторы могут быть разработаны с использованием широко распространенной схемы Аркадьева-Маркса [1], при применении которой подразумевается заряд электрических конденсаторов при их параллельном соединении с последующим разрядом при последовательном соединении. Пример практического применения упомянутого метода для формирования тестовых импульсов приведен в [2], где дано описание генератора с запасаемой энергией до 0.48 МДж, для формирования импульсов напряжения с амплитудой до 3 МВ. Такой подход позволяет имитировать импульсы перенапряжения, которые возникают вследствие ударов молнии, а также коммутационные перенапряжения. Детальное описание метрологического оборудования, используемого в практике формирования высоковольтных импульсов напряжения, приведено в [3]. Хотя применение генераторов Маркса позволяет формировать импульсы напряжения с достаточными уровнями амплитуды и удовлетворительными для практических целей временными характеристиками, практическая реализация таких схем приво-

дит к определенным трудностям, в первую очередь вследствие необходимости применения значительного количества разрядников [4].

Другой широко распространенный подход, который используется в практике получения высоковольтных импульсов напряжения, основан на реализации различных схем, в которых подразумевается усиление импульсов напряжения до необходимого уровня с использованием импульсных трансформаторов. Типичным примером является описанный в [5] импульсный трансформатор с магнитным сердечником, состоящим из 68-и ферритовых стержней. В некоторых технических приложениях определенные преимущества можно получить при использовании воздушных трансформаторов, так как трансформаторы такого типа не требуют дополнительных цепей размагничивания, которые обычно используются для обеспечения максимального размаха магнитной индукции в сердечнике [6].

Одной из наиболее распространенных проблем для высоковольтных установок с импульсными трансформаторами является необходимость определения напряжения на нагрузочной емкости в широком диапазоне изменения ее значений. В случае примене-

ния импульсных трансформаторов с магнитными сердечниками относительно небольшие значения тока холостого хода в некоторых случаях позволяют проводить математический анализ разряда накопительного конденсатора, пренебрегая величиной индуктивности намагничивания. Результаты математического моделирования разрядных процессов накопительного конденсатора на первичную цепь импульсного трансформатора с магнитным сердечником, выполненные в [4], показали, что увеличение величины нагрузочной емкости приводит к уменьшению напряжения на ней. В случае применения воздушного трансформатора его анализ часто проводится без учета активного сопротивления первичной и вторичной обмоток. Детальный анализ переходного процесса в импульсном трансформаторе, с учетом влияния потерь энергии в первичной и вторичной обмотках на величину напряжения на нагрузочной емкости, выполнен в [8]. Однако решение дифференциального уравнения 4 порядка, которое определяет форму тока в первичной и вторичной обмотках, было получено в виде, в котором подразумевается существование только комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения. Такие типы корней обычно имеют место в случае анализа цепей с достаточно высокой добротностью. Следовательно, область применения упомянутого анализа ограничена кругом проблем, которые имеют место в случае достаточно незначительных потерь в первичной и вторичной обмотках. Хотя такой анализ является достаточным для подавляющего большинства практических случаев, повышение потерь в первичной и вторичной обмотках может приводить к другим решениям характеристического уравнения. Очевидно, что такие импульсные трансформаторы будут иметь ухудшенные технические характеристики по сравнению с трансформаторами с уменьшенными потерями. Тем не менее, в случае необходимости формирования импульсов напряжения с определенными требованиями к длительности фронта и среза импульса, например, при формировании импульсов напряжения по форме, близких к апериодической, цепи с уменьшенной добротностью могут представлять определенный интерес. Увеличение активного сопротивления позволяет уменьшить, либо полностью устранить искажения импульсов напряжения, которые вызваны колебательными процессами в электрических цепях с высокой добротностью. Следовательно, для некоторых случаев предпочтительно разработать более универсальное решение, которое позволяет анализировать переходные процессы в первичной и вторичной обмотках импульсного трансформатора для более широкого диапазона потерь мощности в обмотках. Такая проблема рассматривалась также в [9], однако приведенные решения, аналогично результатам [8], описывают случай слабозатухающих колебаний, которые обычно имеют место в случае относительно незначительных потерь в первичной и вторичной обмотках. Кроме того, в [9] не затрагиваются вопросы, связанные с определением напряжения на емкости тестируемого объекта. Выражение для напряжения на нагрузочной емкости в операторной форме и общем виде приведено в [10]. Однако оригинал этого выражения определялся для его упрощенной формы, в которой не учитывалась величина активного сопротивления обмоток. Приведенные в [11] решения

учитывают влияние активного сопротивления вторичной обмотки на напряжение на емкости вторичного контура, но анализ проводился для случая возбуждения первичного контура гармоническим напряжением. В данной работе внимание сконцентрировано на случае возбуждения первичного контура путем разряда накопительной емкости. Детальный анализ условий получения максимальных напряжений на емкости вторичной цепи без учета влияния активного сопротивления обмоток первичной и вторичной цепей на временные характеристики напряжения выполнен в [12]. Отсутствуют публикации, в которых учитывается затухание напряжения на нагрузочной емкости, связанное с параметрами первичной и вторичной цепей [13]. Приведенные в [13] соотношения для напряжения на электрической емкости вторичной обмотки, полученные после проведения такого анализа, также основаны на рассмотрении колебательного напряжения на ней. Таким образом, вопросы формирования на нагрузочной емкости испытательных импульсов напряжения, близких к апериодической форме, тесно связаны с результатами, приведенными в [8] и [13]. Тем не менее, в случае необходимости формирования таких импульсов анализ следует проводить для случая более значительных величин активного сопротивления обмоток, которые приводят к другому типу корней характеристического уравнения.

Целью работы является анализ влияния активного сопротивления первичной и вторичной обмоток импульсного трансформатора на напряжение на нагрузочной емкости на основании разработанной методики анализа переходных процессов, вызванных разрядом накопительной емкости в первичной обмотке.

Анализ схемы замещения импульсного трансформатора. Анализ переходных процессов проведен для схемы замещения трансформатора, приведенной на рис. 1.

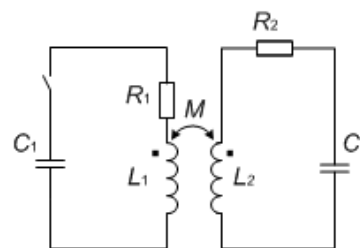


Рис. 1. Схема замещения для определения влияния тестируемого объекта на параметры импульса напряжения на нагрузочной емкости [8]

На схеме замещения на рис. 1 C_1 , C_2 представляют собой емкости конденсатора в первичной обмотке (накопительный конденсатор) и нагрузочной емкости тестируемого объекта во вторичной обмотке; R_1 , R_2 – сопротивления первичной и вторичной цепи; M – коэффициент взаимной индукции между первичной и вторичной обмотками; L_1 , L_2 – индуктивности первичной и вторичной обмоток.

Анализ проведен в предположении о незначительной паразитной емкости первичной и вторичной обмоток (см. рис. 1). В резонансном режиме выполняется равенство:

$$L_1 C_1 = L_2 C_2 . \quad (1)$$

В таком случае схема замещения (рис. 1) фактически представляет собой схему замещения трансформатора Тесла. Для случая пренебрежительно малых активных сопротивлений первичной и вторичной обмоток и ранее приведенного равенства (1), которое определяет соотношения между индуктивностями L_1 , L_2 и емкостями C_1 , C_2 напряжение на нагрузочной емкости C_2 может быть определено с использованием следующего выражения [14]:

$$U_2 = \frac{U_1}{2} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \left[\cos\left(\left(\frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}}\right)t\right) - \cos\left(\left(\frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}}\right)t\right) \right], \quad (2)$$

где k – коэффициент связи между первичной и вторичной обмотками, ω_0 – собственная частота колебаний первичной и вторичной обмоток [14]:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}. \quad (3)$$

Применяя преобразование Лапласа к выражениям для падения напряжения на элементах схемы замещения (рис. 1), можно получить соотношения для определения тока во вторичной обмотке в операторной форме:

$$(pL_1 + R_1 + \frac{1}{pC_1})i_1 - pMi_2 = \frac{u_{c1}}{p}, \quad (4)$$

$$(pL_2 + R_2 + \frac{1}{pC_2})i_2 - pMi_1 = 0, \quad (5)$$

где u_{c1} – напряжение на накопительном конденсаторе в начале переходного процесса.

Учитывая выражения (4) и (5), можно записать выражения для тока во вторичной обмотке:

$$i_2(p) = \frac{p^2 M u_{c1} C_1 C_2}{ap^4 + bp^3 + cp^2 + dp + 1}, \quad (6)$$

где постоянные a , b , c , d могут быть определены с использованием следующих выражений:

$$a = L_2 C_2 L_1 C_1 - M^2 C_1 C_2, \quad (7)$$

$$b = L_2 C_2 R_1 C_1 + R_2 C_2 L_1 C_1, \quad (8)$$

$$c = L_2 C_2 + R_2 C_2 R_1 C_1 + L_1 C_1, \quad (9)$$

$$d = R_2 C_2 + R_1 C_1. \quad (10)$$

В соответствии с обычной схемой применения преобразования Лапласа, выражение для зависимости тока во вторичной цепи от времени может быть записано в общем виде:

$$i_2(t) = \sum_{n=1}^4 \frac{N(p_n)}{M'(p_n)} e^{p_n t}, \quad (11)$$

где все $N(p_n)$ представляют собой величины числителя в формуле (6) в точках, которые соответствуют корням полинома из знаменателя (6), а все $M'(p_n)$ представляют собой значения производной от полинома в знаменателе выражения (6) в точках, соответствующих нулям этого знаменателя.

Таким образом, в предположении, что нагрузочная емкость в начале переходного процесса не заряжена, напряжение на ней может быть найдено с использованием следующего выражения:

$$u_{c2}(t) = \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2(t) dt = \frac{1}{C_2} \sum_{n=1}^4 \frac{N(p_n)}{M'(p_n)} \cdot \left(\frac{e^{p_n t}}{p_n} - \frac{1}{p_n} \right). \quad (12)$$

Поскольку передача энергии из первичной цепи во вторичную производится путем индуктивной связи, анализ переходных процессов необходимо выполнять с учетом зависимости от времени напряжения на индуктивности первичной обмотки. Принимая во внимание соотношения (4) и (5), выражение для тока в первичной цепи может быть записано в виде:

$$i_1(p) = \frac{u_{c1} C_1 (p^2 L_2 C_2 + p R_2 C_2 + 1)}{ap^4 + bp^3 + cp^2 + dp + 1}. \quad (13)$$

Токи в первичной и вторичной цепях определяются выражениями, в которых знаменатель одинаковый (сравни (6) и (13)). Это обстоятельство позволяет упростить моделирование переходных процессов, вызванных разрядом конденсатора C_1 . Принимая во внимание (13), выражение для зависимости тока в первичной обмотке от времени может быть записано в виде:

$$i_1(t) = \sum_{n=1}^4 \frac{W(p_n)}{M'(p_n)} e^{p_n t}, \quad (14)$$

где $W(p_n)$ представляют собой величины числителя из (13) в точках, которые соответствуют корням полинома из знаменателя (6) и (13).

С учетом выражения (14), падение напряжения на индуктивности первичной обмотки L_1 может быть определено с использованием следующего выражения:

$$u_{L1}(t) = L_1 \sum_{n=1}^4 \frac{W(p_n)}{M'(p_n)} p_n e^{p_n t}. \quad (15)$$

С учетом (11) и (14) при учете (4) и (5) выражения для напряжений на нагрузочной емкости (12) и индуктивности первичной обмотки (15) можно записать в виде:

$$u_{C2}(t) = M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} + Ri_2(t), \quad (16)$$

$$u_{L1}(t) = u_{c1} + M \frac{di_2(t)}{dt} - i_1(t) R_1 - \frac{1}{C} \int_0^t i_1(t) dt. \quad (17)$$

Выражения (16) и (17) также могут быть использованы для частичной проверки ранее приведенных формул для напряжений на нагрузочной емкости и индуктивности первичной обмотки.

Результаты моделирования переходных процессов в первичной и вторичной обмотках, вызванных разрядом накопительного конденсатора. На рис. 2-5 приведены результаты расчетов переходных процессов в описанной модели импульсного трансформатора при его работе на емкостную нагрузку. Все расчеты и измерения были проведены при значении взаимной индукции между первичной и вторичной обмотками $M = 1,133 \cdot 10^{-4}$ Гн. Индуктивность первичной обмотки принята равной $L_1 = 186 \cdot 10^{-6}$ Гн. Индуктивность вторичной обмотки: $L_2 = 126 \cdot 10^{-6}$ Гн. Несмотря на то, что в практических приложениях такие параметры цепи не обеспечивают определенных преимуществ с точки зрения технических характеристик, они могут быть использованы, как для проверки описанных решений, так и для определения общих тенденций переходных процессов в первичной и вторичной обмотках.

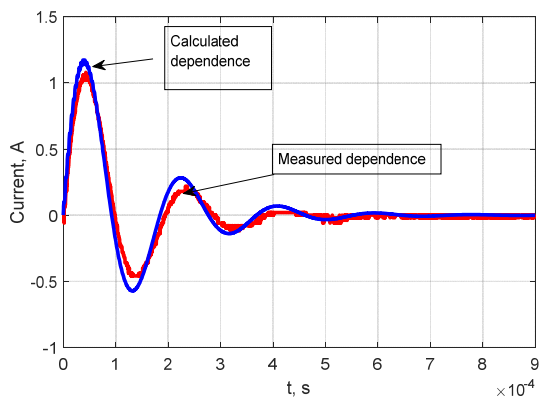


Рис. 2. Результаты моделирования и измерения тока в первичной обмотке для $C_2 = 6,128 \cdot 10^{-9}$ Ф, $C_1 = 4,5 \cdot 10^{-6}$ Ф, $R_2 = 1,57$ Ом, $R_1 = 2,79$ Ом

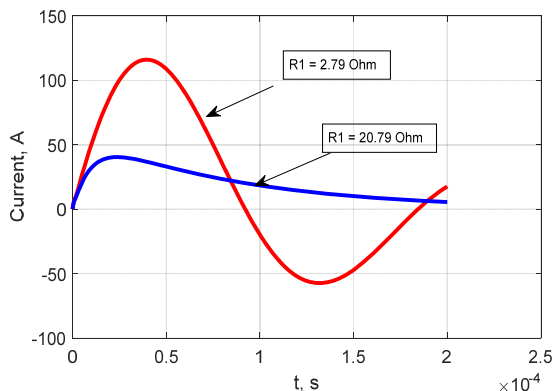


Рис. 3. Токи в первичной обмотке для $C_2 = 6,128 \cdot 10^{-9}$ Ф, $C_1 = 4,5 \cdot 10^{-6}$ Ф и зарядном напряжении 1000 В

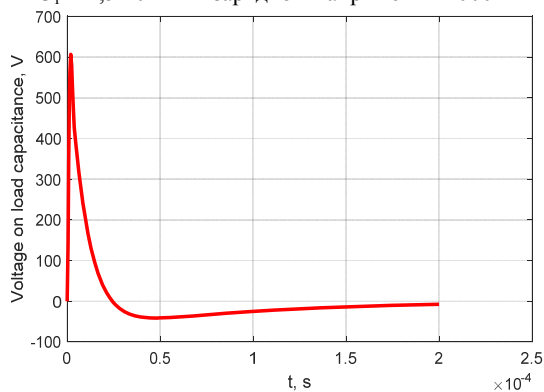


Рис. 4. Напряжение на нагрузочной емкости при активном сопротивлении первичной обмотки 20,79 Ом и сопротивлении вторичной обмотки 100,57 Ом

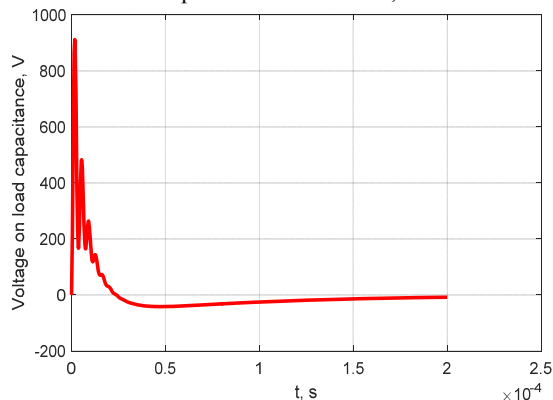


Рис. 5. Напряжение на нагрузочной емкости при активном сопротивлении первичной обмотки 20,79 Ом и сопротивлении вторичной обмотки 20,57 Ом

Из приведенных результатов видно, что даже в случае режима аperiodического разряда накопительного конденсатора C_1 (результаты расчета на рис. 3), который может быть обеспечен путем увеличения активного сопротивления первичной обмотки, при проведенном математическом моделировании не удается добиться аperiodической формы напряжения на нагрузочной емкости (результаты расчета на рис. 4). При этом при аperiodическом режиме разряда накопительного конденсатора не обеспечивается отсутствие выбросов, искажающих форму напряжения на нагрузочной емкости тестируемого объекта, которые отчетливо видны на рис. 5. Устранения проиллюстрированных искажений можно добиться путем увеличения постоянной времени RC цепочки во вторичной цепи трансформатора, действие которой на форму импульса напряжения видно на рис. 4.

Выводы.

1. Описанные решения, полученные с использованием преобразования Лапласа, могут быть использованы в случае необходимости формирования на емкостной нагрузке импульсов напряжения, близких по форме к аperiodическим, путем регулирования величины активного сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора.

2. Увеличение активного сопротивления первичной обмотки позволяет добиться аperiodического режима разряда накопительного конденсатора. Тем не менее, даже при таком режиме разряда не удается обеспечить аperiodическую форму напряжения на нагрузочной емкости. Один из возможных путей получения на емкостной нагрузке импульсов напряжения, максимально приближенных к аperiodической форме, заключается в увеличении активного сопротивления первичной обмотки до значений, обеспечивающих аperiodический разряд накопительной емкости, с последующим увеличением активного сопротивления вторичной обмотки, для устранения выбросов, искажающих форму напряжения.

3. Негативным следствием описанного подхода к формированию импульсов напряжения является обстоятельство, согласно которому устранение выбросов, искажающих форму напряжения, за счет увеличения активного сопротивления обмоток сопровождается неизбежным уменьшением амплитуды импульса напряжения на емкостной нагрузке.

4. Использование приведенной методики проведения расчетов переходных процессов позволяет осуществлять регулирование активного сопротивления обмоток с целью устранения искажений фронта формируемого на емкостной нагрузке импульса напряжения высокочастотными колебаниями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. Получение стандартных коммутационных аperiodических импульсов высокого и сверхвысокого напряжения для натурных испытаний электроэнергетических объектов // *Электротехника і електромеханіка*. – 2013. – №2. – С. 52-56. doi: 10.20998/2074-272X.2013.2.10.
2. Баранов М.И., д.т.н., Бочаров В.А., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К. Мощные генераторы импульсных напряжений и токов предельных параметров для тестирования силового электроэнергетического оборудования // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2003. – №2. – С. 75-80.
3. Баранов М.И., Буряковский С.Г., Рудаков С.В. Метрологическое обеспечение в Украине испытаний объектов энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на стойкость к воздействию импульсов тока (напряжения) ис-

кусственной молнии и коммутационных импульсов напряжения // *Электротехника і електромеханіка*. – 2018. – №5. – С. 44-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.5.08.

4. Иванов В.М. Высоковольтные импульсные трансформаторы с низкой индуктивностью рассеяния // *Электротехника і електромеханіка*. – 2010. – №5. – С. 17-20. doi: 10.20998/2074-272X.2010.5.04.

5. Liu Z., Winands G.J.J., Van K., Pemen A.J.M., van Heesch E.J.M. A high-voltage pulse transformer with a modular ferrite core // *Review of Scientific Instruments*. – 2008. – vol.79. – no.1. – pp. 625-630. doi: 10.1063/1.2830943.

6. Bortis D., Biela J., Kolar J. W. Optimal design of a DC reset circuit for pulse transformers // *Proceedings of the IEEE Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition APEC 07 (Cat. No.99TH8475)*. – 2007. – pp. 1171-1177. doi: 10.1109/APEX.2007.3576663.

7. Lee Li, Chaobing Bao, Xibo Feng, Yunlong Liu, Lin Fochan. Fast switching thyristor applied in nanosecond-pulse high-voltage generator with closed transformer core // *Review of Scientific Instruments*. – 2013. – vol.84. – no.2. – pp. 425-432. doi: 10.1063/1.4792593.

8. Corum J., Daum J. Moore H.L. Tesla coil research. – New Jersey, US army armament research, development and engineering center Publ., 1992. – 38 p.

9. Конторович М.И. Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях. – М.: Гостехиздат, 1955. – 277 с.

10. Smith P.W. *Transient electronics. Pulsed circuit technology*. – New-York, John Wiley & Sons Publ., 2011. – 288 p.

11. Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А., Сабокарь О.С. Резонанс во вторичном контуре трансформатора Тесла при возбуждении гармоническим напряжением // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2017. – №30(1252). – С. 21-27.

12. Denicolai M. Optimal performance for Tesla transformers // *Review of Scientific Instruments*. – 2002. – vol.73. – no.9. – pp. 3332-3336. doi: 10.1063/1.1498905.

13. Reed J.L. Note: Tesla transformer damping // *Review of Scientific Instruments*. – 2012. – vol.83. – no.7. – pp. 76101-76103. doi: 10.1063/1.4732811.

14. Ваврів Л.В., Іванов В.М., Марценюк В.С., Мірзоев Р.С. Пристрої для отримання імпульсів високої напруги в електротехнології // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2017. – №15(1237). – С. 23-30.

REFERENCES

1. Baranov M. I., Koliushko G. M., Kravchenko V. I. Generation of standard switching aperiodic impulses of high and super-high voltage for full-scale tests of electrical power objects. *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.2, pp. 52-56. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2013.2.10.

2. Baranov M.I., Bocharov V.A., Ignatenko N.N., Kolobovskiy A.K. Powerful generators of pulse voltages and currents with top parameters for testing of power electroenergetic equipment. *Electrical engineering & electromechanics*, 2003, no.2, pp. 75-80. (Rus).

3. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The metrology support in Ukraine of tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulses of current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.5, pp. 44-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.5.08.

4. Ivanov V.M. High voltage pulsed transformers with low leakage inductance. *Electrical engineering & electromechanics*, 2010, no.5, pp. 17-20. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2010.5.04.

5. Liu Z., Winands G.J.J., Van K., Pemen A.J.M., van Heesch E.J.M. A high-voltage pulse transformer with a modular ferrite core. *Review of Scientific Instruments*. 2008, vol.79, no.1. pp. 625-630. doi: 10.1063/1.2830943.

6. Bortis D., Biela J., Kolar J. W. Optimal design of a DC reset circuit for pulse transformers. *Proceedings of the IEEE Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition APEC 07 (Cat. No.99TH8475)*, 2007, pp. 1171-1177. doi: 10.1109/APEX.2007.3576663.

7. Lee Li, Chaobing Bao, Xibo Feng, Yunlong Liu, Lin Fochan. Fast switching thyristor applied in nanosecond-pulse

high-voltage generator with closed transformer core. *Review of Scientific Instruments*. 2013, vol.84, no.2. pp. 425-432. doi: 10.1063/1.4792593.

8. Corum J., Daum J. Moore H. L. *Tesla coil research*. New Jersey, US army armament research, development and engineering center Publ., 1992, 38 p.

9. Kontorovich M.I. *Operatsionnoe ischislenie i nestatsionarnye yavleniya v elektricheskikh tsepiakh* [Operational calculus and non-stationary phenomena in electrical circuits]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1955. 277 p. (Rus).

10. Smith P.W. *Transient electronics. Pulsed circuit technology*. New-York, John Wiley & Sons Publ, 2011. 288 p.

11. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shynderuk S.A., Sobokar O.S. Resonance in the secondary circuit of the Tesla transformer excited by the harmonic voltage. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2017, no.30(1252), pp. 21-27. (Rus).

12. Denicolai M. Optimal performance for Tesla transformers. *Review of Scientific Instruments*. 2002, vol.73, no.9. pp. 3332-3336. doi: 10.1063/1.1498905.

13. Reed J.L. Note: Tesla transformer damping. *Review of Scientific Instruments*. 2012, vol.83, no.7. pp. 76101-76103. doi: 10.1063/1.4732811.

14. Vavriv L.V., Ivanov V.M., Martsenyuk V.E., Mirzoev R.S. Devices for obtaining high voltage pulses in electrotechnologies. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2017, no.15(1237), pp. 23-30. (Ukr).

Поступила (received) 25.04.2019

Гурин Анатолий Григорьевич¹, д.т.н., проф.,
Костюков Иван Александрович¹, к.т.н.,
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
e-mail: iakostiukov@gmail.com

A.G. Gurin¹, I.A. Kostyukov¹,

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

The effect of the active resistance of the pulse transformer windings on the parameters of voltage pulses generated on a capacitive load.

Goal. Analysis of the influence of the active resistance of the primary and secondary windings of a pulse transformer on the voltage at the load capacitance based on the developed methodology for the analysis of transients caused by the discharge of the storage capacitance in the primary winding. **Methodology.** A model for calculating transients is developed using the Laplace transform. Transient modeling is carried out in the MATLAB software package. The results of transient calculations are compared with experimental results. **Results.** A method for calculating transients in test installations with pulse transformers has been developed, which allows taking into account the effect of power losses in the primary and secondary windings on the voltage at the load capacitance. The calculated relations are obtained, allowing to take into account the influence of the active resistance of the primary and secondary windings of the transformer on the voltage at the load capacitance, the currents in the primary and secondary windings of the transformer, as well as on the voltage drop on the inductance of the primary winding of the transformer. **Scientific novelty.** A mathematical model is developed for calculating transients in the primary and secondary windings of a pulse transformer, taking into account the influence of the active resistance of the windings when it changes over a wide range of possible values. **Practical value.** Using the proposed technique, it is possible to determine the parameters of the discharge circuit at which test voltage pulses are formed on the load capacitance without distorting the shape of the pulse front. References 14, figures. 5.

Key words: pulse transformer, capacitive load, winding active resistance, test voltage pulse, electrical insulation test.