

УДК 621.314

А. Н. Данилин, А. А. Климов

Экспериментальные исследования характеристик импульсных трансформаторов с различными типами магнитопроводов, выполненных по каскадной схеме

В настоящее время теория и расчет высоковольтных однокаскадных импульсных трансформаторов (ИТ) хорошо разработаны. Их характеристики определяются в зависимости от вида и параметров нагрузки. Вместе с тем практически не разработана методика расчета ИТ по каскадной схеме, основным достоинством которой является перенос изоляции из внутренней на внешнюю. За счет этого может быть снижена напряженность на внутренней изоляции в число раз, составляющих число ИТ в каскаде. В статье приводятся результаты сравнительных экспериментальных исследований характеристик однокаскадных и двухкаскадных ИТ, включаемых на резистивную нагрузку и в режиме перезаряда емкостного накопителя через ИТ на обостряющую емкость. Рассмотрены два типа ИТ, имеющих одинаковые коэффициенты трансформации, числа витков обмоток и сечения магнитопроводов сердечников, но отличающихся магнитными характеристиками сердечников. Методика сравнительных исследований заключалась в определении формирующих свойств одно- и двухкаскадных схем ИТ при разряде емкостного накопителя на резистивную и емкостную нагрузку через ИТ с последующим осциллографированием токов и напряжений на нагрузке. Сравнительные исследования определили область применения каскадных схем ИТ. В статье показано, что многокаскадные схемы ИТ крайне неэффективны в схемах формирования импульсов на резистивную нагрузку из-за того, что индуктивные элементы схем замещения каскадных ИТ образуют индуктивный делитель напряжения. Показано, что каскадная схема ИТ эффективна в режиме перезаряда емкостного накопителя на обостряющую емкость в согласованном режиме, при этом КПД такой схемы близок к 100 %, и реализуются те положительные свойства, которыми обладают каскадные схемы.

Ключевые слова: импульсный трансформатор, магнитопровод, холостой ход, короткое замыкание, каскадное соединение.

Введение

Разработка и проектирование высоковольтных импульсных трансформаторов (ИТ) рассмотрена в ряде источников [1–4], где изложены методы расчета и конструирования ИТ. Тем не менее совершенно отсутствует методика разработки ИТ по каскадной схеме. Основное преимущество каскадных схем трансформаторов на высокие напряжения в том, что внутренняя изоляция выходного каскада относительно земли не сосредоточена на одном элементе каскада, а распределена между изоляционными промежутками входящих в каскад трансформаторов. Основным недостатком каскадного включения трансформаторов является большая величина индуктивности рассеяния каскада в целом, которая растет быстрее, чем произведение индуктивностей рассеяния трансформатора на число ступеней каскада.

Для ИТ в схемах формирования импульсов с заданными параметрами этот недостаток каскадной схемы является решающим, и поэтому в таких схемах каскадные ИТ применяются редко. В ряде схем, находящих применение в электроимпульсных технологиях, где ИТ служит для повышения напряжения на обостряющих конденсаторах [5–7], каскадный ИТ может успешно использоваться. За счет распределения напряжения между каскадами и переноса изоляции из внутренней на внешнюю может быть значительный выигрыш в поперечных размерах ИТ. Такие устройства могут находить применение там, где ИТ должен помещаться в объемах, имеющих ограниченный поперечный размер, например, в буровых и каротажных скважинах, в специальных электрофизических установках.

Сформулированы следующие задачи исследований:

1. Провести сравнительные опыты с устройствами ИТ, выполненными по однокаскадной и двухкаскадной схемам.
2. Изучить параметры однокаскадных и двухкаскадных ИТ при использовании различных материалов магнитопровода.
3. Изучить формирующие свойства обеих схем в режиме формирования импульса на активной (резистивной) нагрузке и в режиме перезаряда емкостного накопителя на обостряющую емкость.
4. Экспериментально оценить параметры схем замещения ИТ, выполненных по однокаскадной и двухкаскадной схемам.

Материалы и методы

На рис. 1 приведена использованная для проведения экспериментальных исследований схема установки, позволяющая проводить опыты с однокаскадными и двухкаскадными ИТ. Импульс на входе ИТ формировался

путем разряда емкости C_1 , которая заряжалась через первичную обмотку ИТ и разряжалась на нее при коммутации ключа K . Схема позволяет изучать параметры как однокаскадных, так и двухкаскадных ИТ.

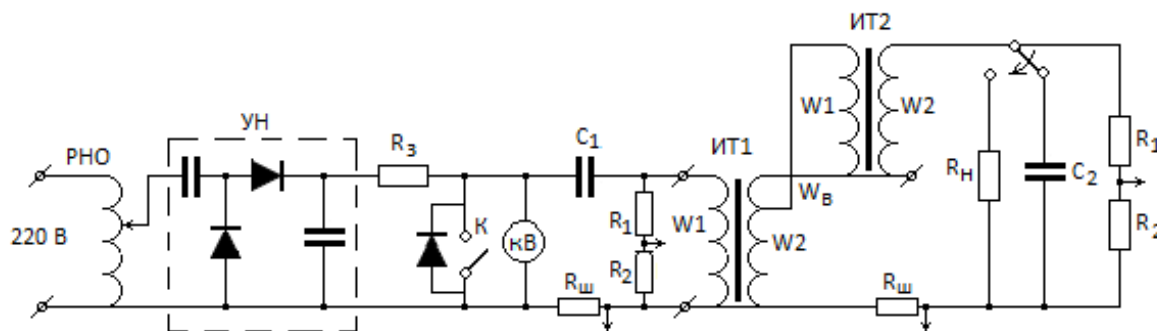


Рис. 1. Схема установки для проведения экспериментальных исследований
 Fig. 1. Apparatus for carrying out experimental research

Измерения выполнялись цифровым осциллографом типа АКТАКОМ с помощью делителей напряжения ($R_1 - R_2$) и токовых шунтов ($R_{ш}$).

Для проведения исследований были разработаны тороидальные ИТ с различными типами магнитопроводов, конструктивные параметры которых приведены на рис. 2. Сердечники ИТ двух типов: из пермаллоя и из распыленного железа. Число витков первичной обмотки и обмотки возбуждения $w_1 = w_B = 10$, вторичной – $w_2 = 40$, коэффициент трансформации каждого ИТ $K_T = 4$. Первичная обмотка однослойная, вторичная – двухслойная. На рис. 3 приведены магнитные характеристики этих двух материалов. Их относительные магнитные проницаемости отличаются многократно: пермаллой – $\mu = 1\,600$, распыленное железо – $\mu = 100$.

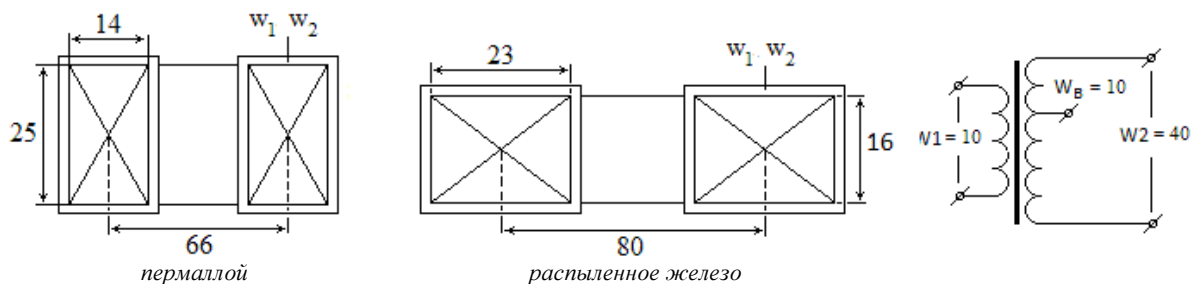


Рис. 2. Конструктивные параметры ИТ
 Fig. 2. The design parameters of PT

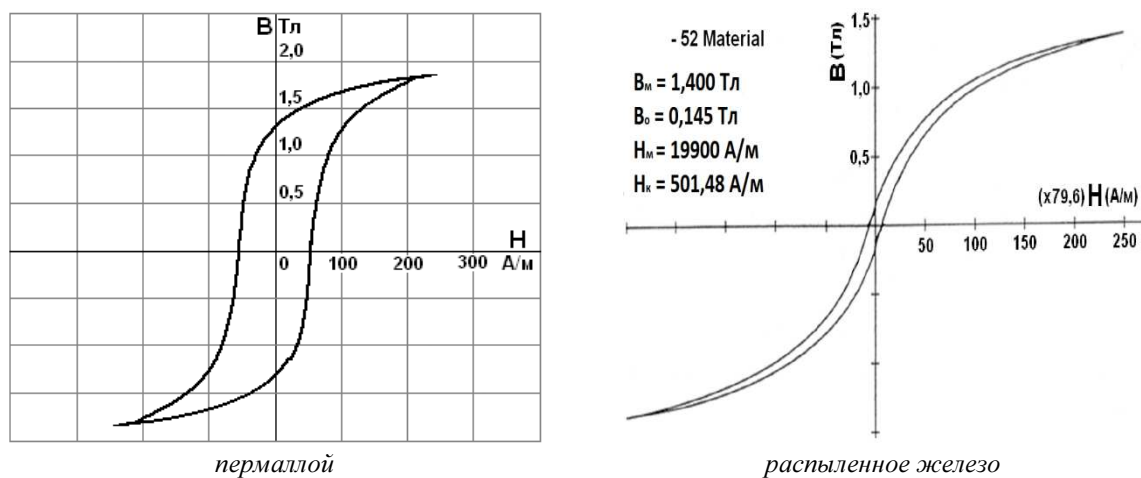


Рис. 3. Петли гистерезиса сердечников из пермаллоя и распыленного железа
 Fig. 3. The hysteresis loops of cores made of permalloy and atomized iron

Схемы замещения двухкаскадных ИТ представлены на рис. 4 в полном и упрощенном варианте, где L_{S1} и L_{S2} – индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток, L_{M1} и L_{M2} – индуктивности намагничивания ИТ первого и второго каскадов, $C_{\pi 1}$ и $C_{\pi 2}$ – динамические емкости ИТ первого и второго каскадов. Индуктивности рассеяния первичных обмоток меньше, чем у вторичных, в K_T^2 раз, поэтому в расчетах ими можно пренебречь.

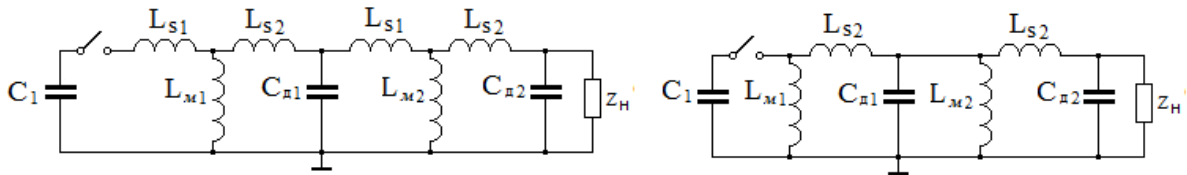


Рис. 4. Схемы замещения двухкаскадных ИТ в полном и упрощенном варианте
Fig. 4. Schemes of two-stage PT replacement in the full and simplified version

Для расчетов значений L_{S2} , L_{M1} и L_{M2} используются экспериментальные данные опытов холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) одиночных и каскадных ИТ.

Из опытов ХХ и КЗ можно определить индуктивности намагничивания однокаскадных и двухкаскадных ИТ, а также индуктивности рассеяния. Схемы замещения этих опытов приведены на рис. 5 и 6.

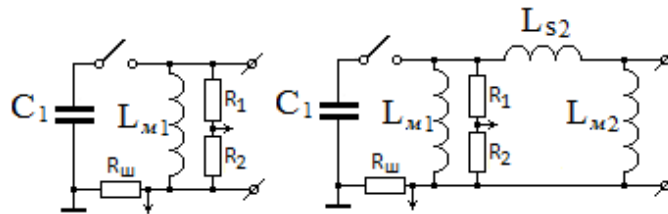


Рис 5. Схемы замещения при опытах ХХ для однокаскадного и двухкаскадного ИТ
Fig. 5. The equivalent circuit with experiments of the idling for a single-stage and two-stage PT

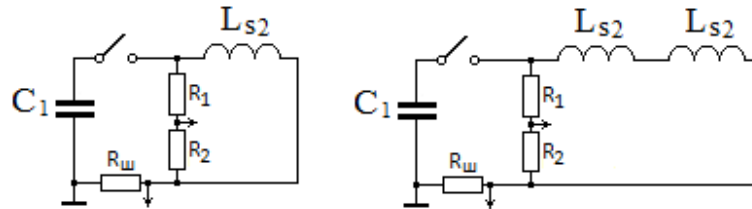


Рис 6. Схемы замещения при опытах КЗ для однокаскадного и двухкаскадного ИТ
Fig. 6. The equivalent circuit short-circuit tests for single-stage and two-stage PT

Эти параметры определяются исходя из экспериментально определяемых периодов колебаний при различных включениях однокаскадных и двухкаскадных ИТ, которые приведены в формулах 1–4.

1. Режим холостого хода.

Однокаскадный ИТ:

$$T_{xx} = 2\pi\sqrt{C_1 L_{\mu 1}} . \quad (1)$$

Двухкаскадный ИТ:

$$T_{K3} = 2\pi\sqrt{C_1 L_{\mu(\text{эКВ})}} , \text{ где } L_{\mu(\text{эКВ})} = \frac{L_{\mu 1} (L_{\mu 2} + L_{S2})}{L_{\mu 1} + L_{\mu 2} + L_{S2}} . \quad (2)$$

2. Режим короткого замыкания.

Однокаскадный ИТ:

$$T_{K3} = 2\pi\sqrt{C_1 L_{S2}} . \quad (3)$$

Двухкаскадный ИТ:

$$T_{K3} = 2\pi\sqrt{C_1 L_{S2(\text{эКВ})}} , \text{ где } L_{S2(\text{эКВ})} = 2L_{S2} . \quad (4)$$

Результаты и обсуждение

Осциллограммы опытов ХХ и КЗ приведены на рис. 7.

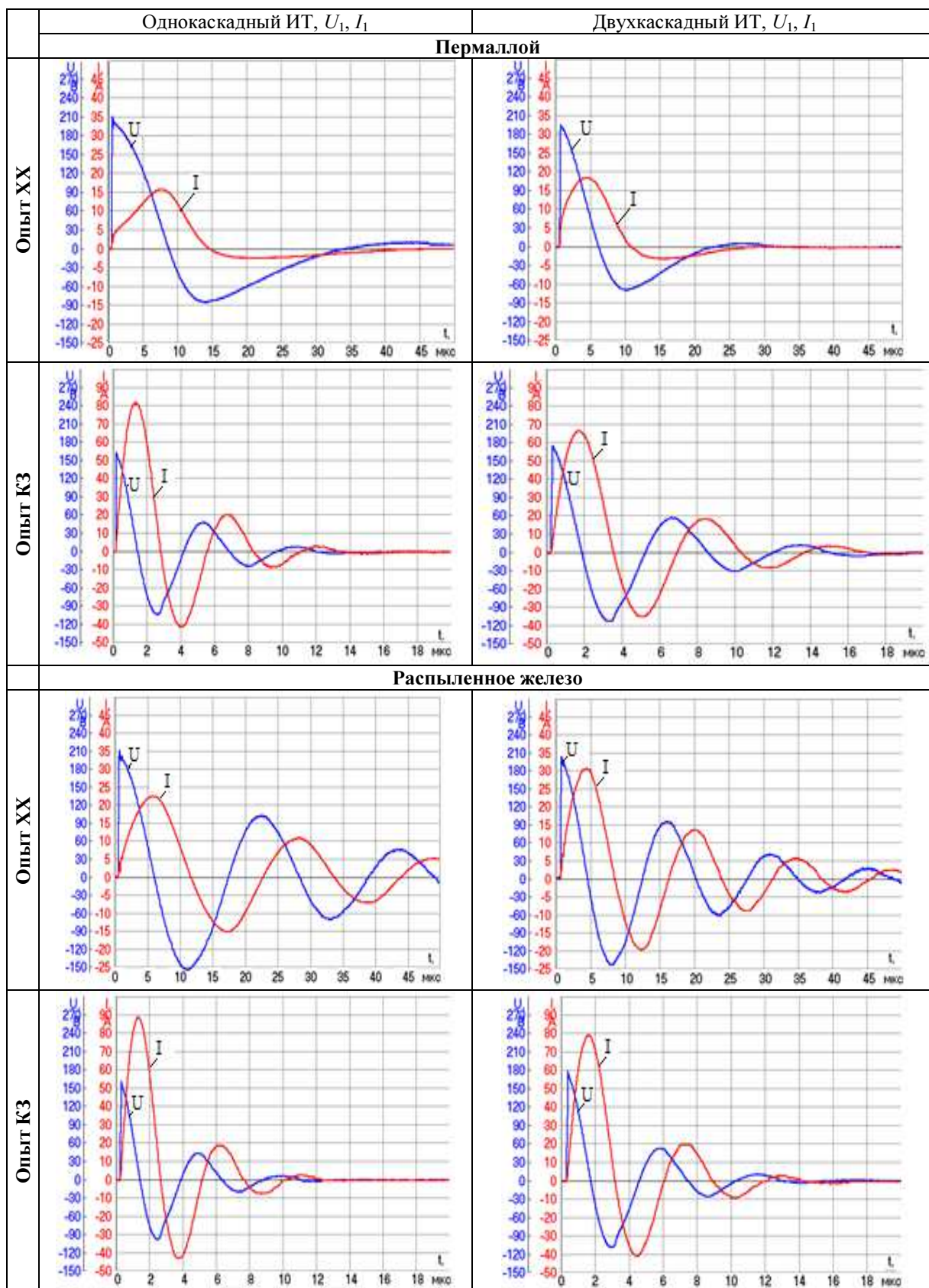


Рис. 7. Токи и напряжения в первичных обмотках ИТ при режимах КЗ и ХХ
 Fig. 7. The currents and voltages in the primary windings of PT in short-circuit conditions and idling

Экспериментальная оценка динамической емкости ИТ проведена на основе осциллограмм осцилляций на фронте импульса напряжения на вторичных обмотках ИТ. На холостом ходу величина периода фронтных осцилляций T_0 зависит от соотношения индуктивностей рассеивания ИТ, а также генераторной и динамических емкостей. Тогда величина C_d , приведенная к первичной обмотке, определяется:

$$C_d = \frac{T_0^2 \cdot C_1}{4\pi \cdot L_{S1} \cdot C_1 - T_0^2} \quad (5)$$

Осциллограммы с паразитными колебаниями на фронтах импульса напряжения вторичных обмоток ИТ в опытах холостого хода приведены на рис. 8.

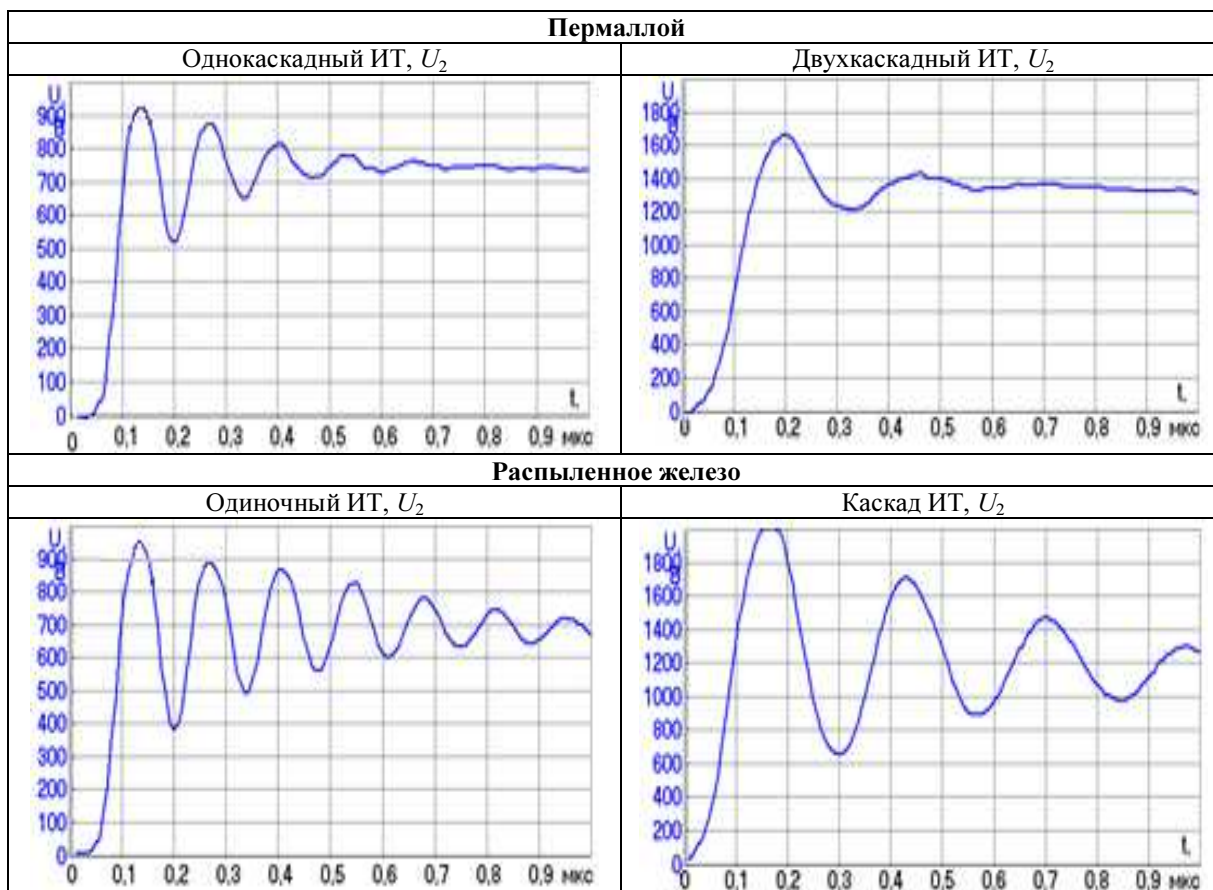


Рис. 8. Осцилляции на фронтах импульсов при ХХ ИТ
Fig. 8. Oscillations at the edges of the pulses at PT idling

Сравнение расчетных параметров ИТ и паразитных динамических емкостей однокаскадных и двухкаскадных ИТ с различными типами сердечников проведено в табл. 1. В скобках указаны параметры, приведенные ко вторичной обмотке, с учетом того, что у однокаскадного ИТ $K_T = 4$, у двухкаскадного – $K_T = 8$.

Таблица 1. Расчетные параметры ИТ
Table 1. Design parameters of PT

	Одиночный ИТ		Каскадный ИТ	
	Пермаллой	Распыленное железо	Пермаллой	Распыленное железо
L_{S2} (мкГн)	1,35 (22,1)	1,25 (20)	2,45 (157)	1,8 (115)
L_{M1} (мкГн)	61,3 (981)	25,3 (405)	31,2 (1997)	12,8 (819)
C_d (пФ)	242,9 (15,2)	352,3 (22,0)	676,6 (10,6)	933,0 (14,6)

Можно отметить, что приведенная к вторичной обмотке динамическая емкость крайне мала и ею при расчетах для данных моделей можно пренебречь.

Анализ данных табл. 1 показывает, что индуктивные и емкостные параметры схем замещения у двухкаскадных ИТ в сравнении с однокаскадными ИТ имеют соотношения, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительные значения параметров схем замещения однокаскадных и двухкаскадных ИТ
Table 2. Comparative values of single-stage and two-cycle PT equivalent circuit parameters

Сердечник	Пермаллой	Распыленное железо
L_{S2} (двухкаскад. ИТ) / L_{S2} (однокаскад. ИТ)	1,8	1,5
L_{M1} (двухкаскад. ИТ) / L_{M1} (однокаскад. ИТ)	0,58	0,67
C_d (двухкаскад. ИТ) / (однокаскад. ИТ)	2,8	2,64

Расчеты параметров однокаскадных трансформаторов по известным методикам [1] дали значения, близкие к экспериментальным, следовательно, указанные в табл. 2 соотношения можно считать достоверными и их можно использовать в предложенных схемах замещения для каскадных ИТ (рис. 4). Действительно, индуктивности намагничивания в каскаде практически уменьшаются вдвое, индуктивности рассеяния при этом близки к удвоению.

Далее приведены результаты опытов при работе однокаскадных и двухкаскадных ИТ на резистивную и емкостную нагрузку. На рис. 9 приведены схемы опытов.

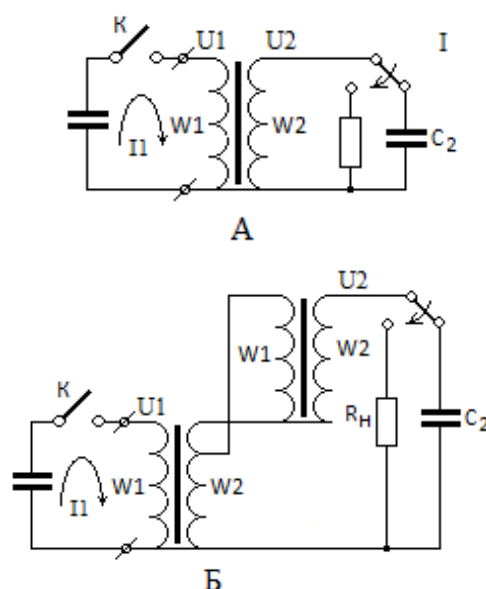


Рис. 9. Схемы опытов с резистивной и емкостной нагрузкой для однокаскадных (А) и двухкаскадных (Б) ИТ

Fig. 9. Scheme of experiments with resistive and capacitive load for the single-stage (A) and two-stage (B) PT

Показано, что реальные значения K_T отличаются от конструктивных и зависят от величины нагрузки. (Конструктивные K_T для однокаскадных ИТ: $K_T = 4$, для двухкаскадных ИТ: $K_T = 8$.) Значения опытных K_T в зависимости от нагрузки приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3. K_T однокаскадных ИТ, резистивная нагрузка
Table 3. K_T of single-stage PT, resistive load

Нагрузка, Ом	100	600	Холостой ход
ИТ (сердечник – пермаллой)	3,5	3,7	3,8
ИТ (сердечник – распыленное железо)	3,4	3,5	3,7

Таблица 4. K_T двухкаскадных ИТ, резистивная нагрузка
Table 4. K_T of two-stage PT, resistive load

Нагрузка, Ом	100	600	Холостой ход
ИТ (сердечник – пермаллой)	3,7	6,4	7,3
ИТ (сердечник – распыленное железо)	4,0	6,2	7,0

Осциллограммы формирования импульсов на резистивной нагрузке приведены на рис. 10 и 11.

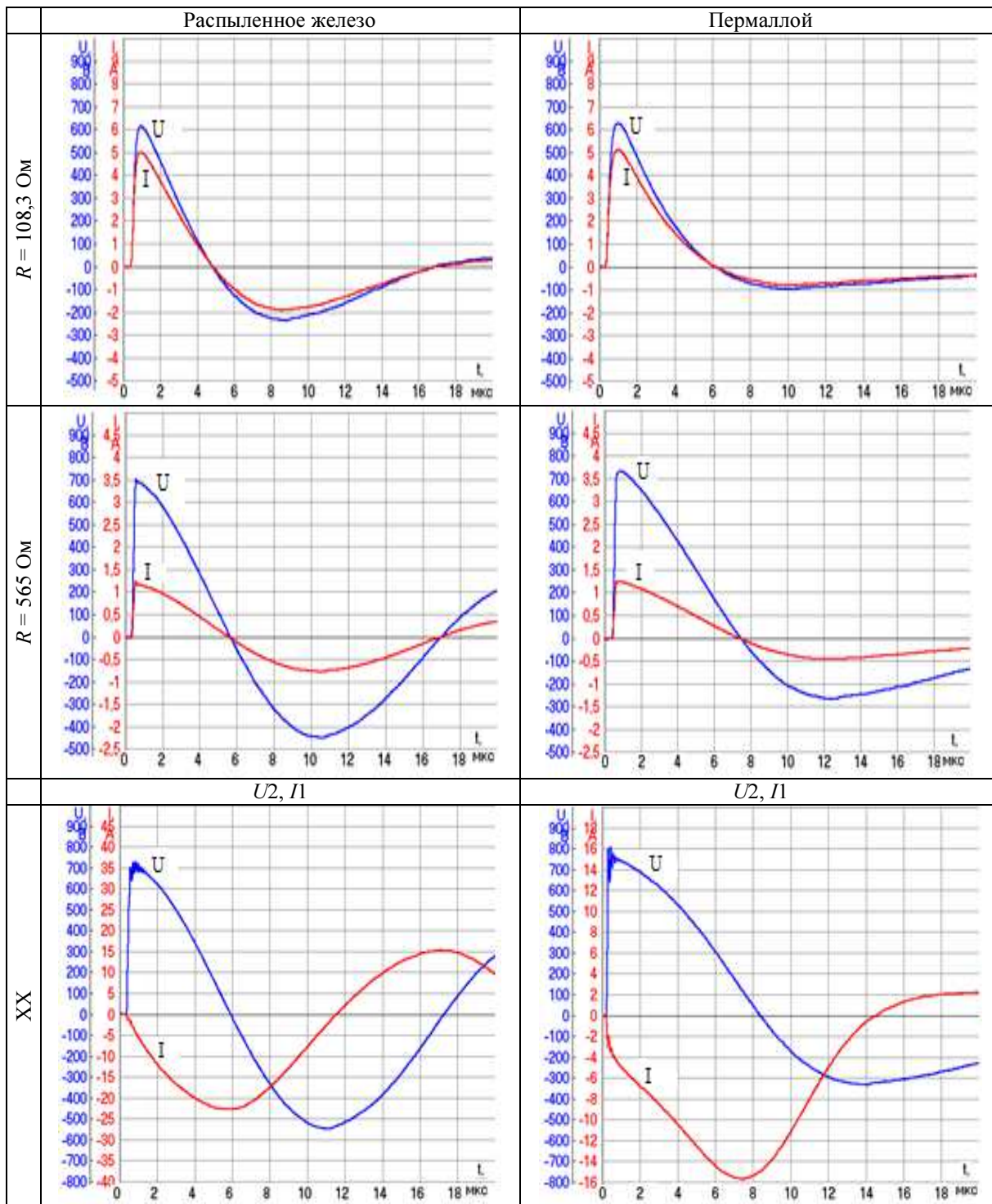


Рис. 10. Однокаскадный ИТ, U_2, I_2 , резистивная нагрузка
 Fig. 10. Single-stage PT, U_2, I_2 , resistive load

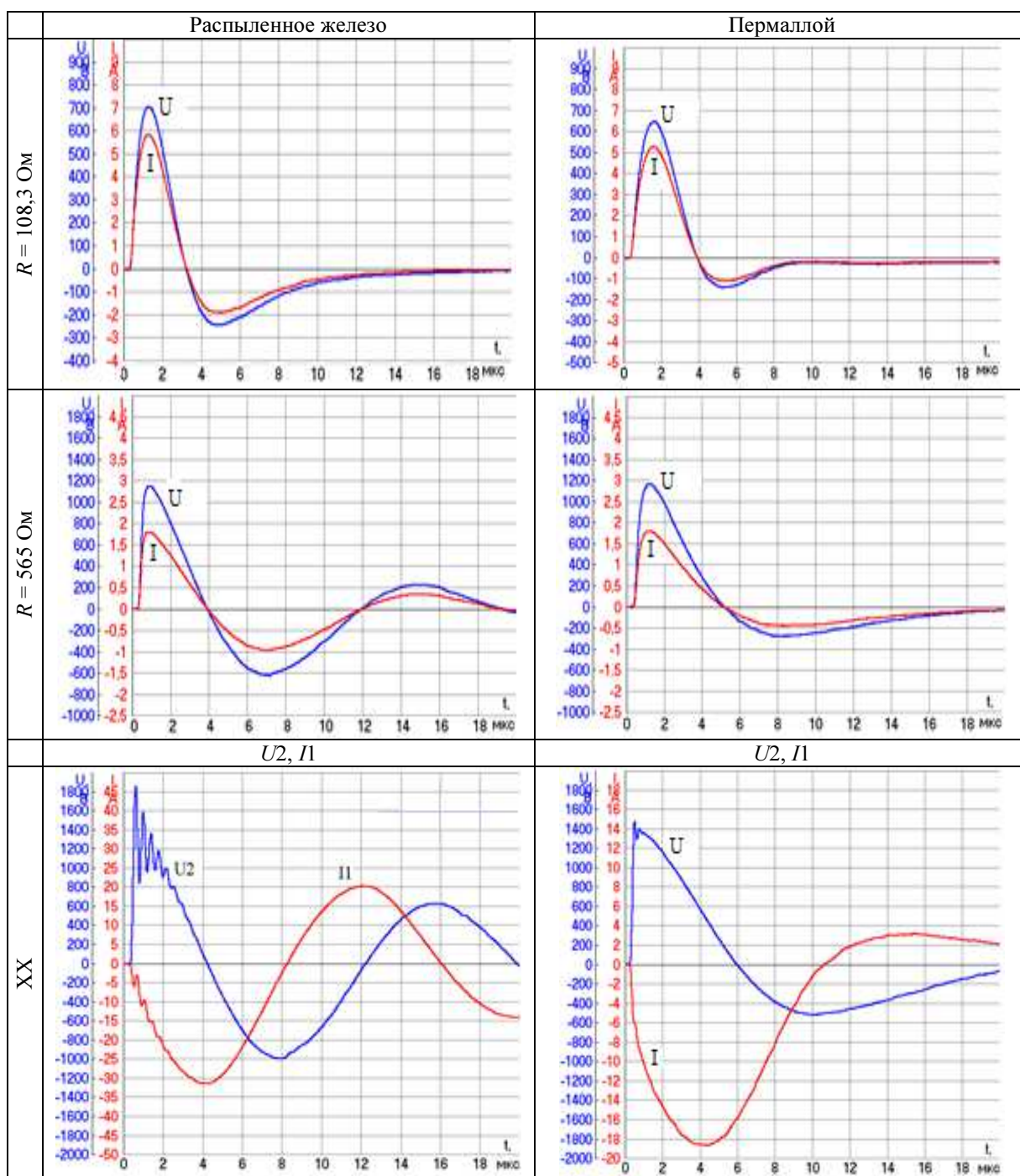


Рис. 11. Двухкаскадный ИТ, U_2 , I_2 , резистивная нагрузка
 Fig. 11. Two-stage PT, U_2 , I_2 , resistive load

Результаты опытов с емкостной нагрузкой приведены в табл. 5 и 6. Основной интерес представляют результаты опытов при согласованных емкостях, а именно: $C_2 = C_1/K_T^2$.

Таблица 5. K_T однокаскадных ИТ, емкостная нагрузка (согласованная емкость $C_2 = 33\ 000$ пФ)
 Table 5. K_T of single-stage PT capacitive load (coordinated capacity $C_2 = 33\ 000$ pF)

Нагрузка, пФ	2 250	8 200	33 000
ИТ (сердечник – пермаллой)	5,38	5,75	4,29
ИТ (сердечник – распыленное железо)	4,95	5,05	4,29

Таблица 6. K_T двухкаскадных ИТ, емкостная нагрузка (согласованная емкость $C_2 = 8\ 200$ пФ)
 Table 6. K_T of two-stage PT, capacitive load (coordinated capacity $C_2 = 8\ 200$ pF)

Нагрузка, пФ	2 250	4 450	8 200
ИТ (сердечник – пермаллой)	11,3	9,28	7,64
ИТ (сердечник – распыленное железо)	11,25	9,2	7,60

Осциллограммы формирования импульсов на емкостной нагрузке приведены на рис. 12.

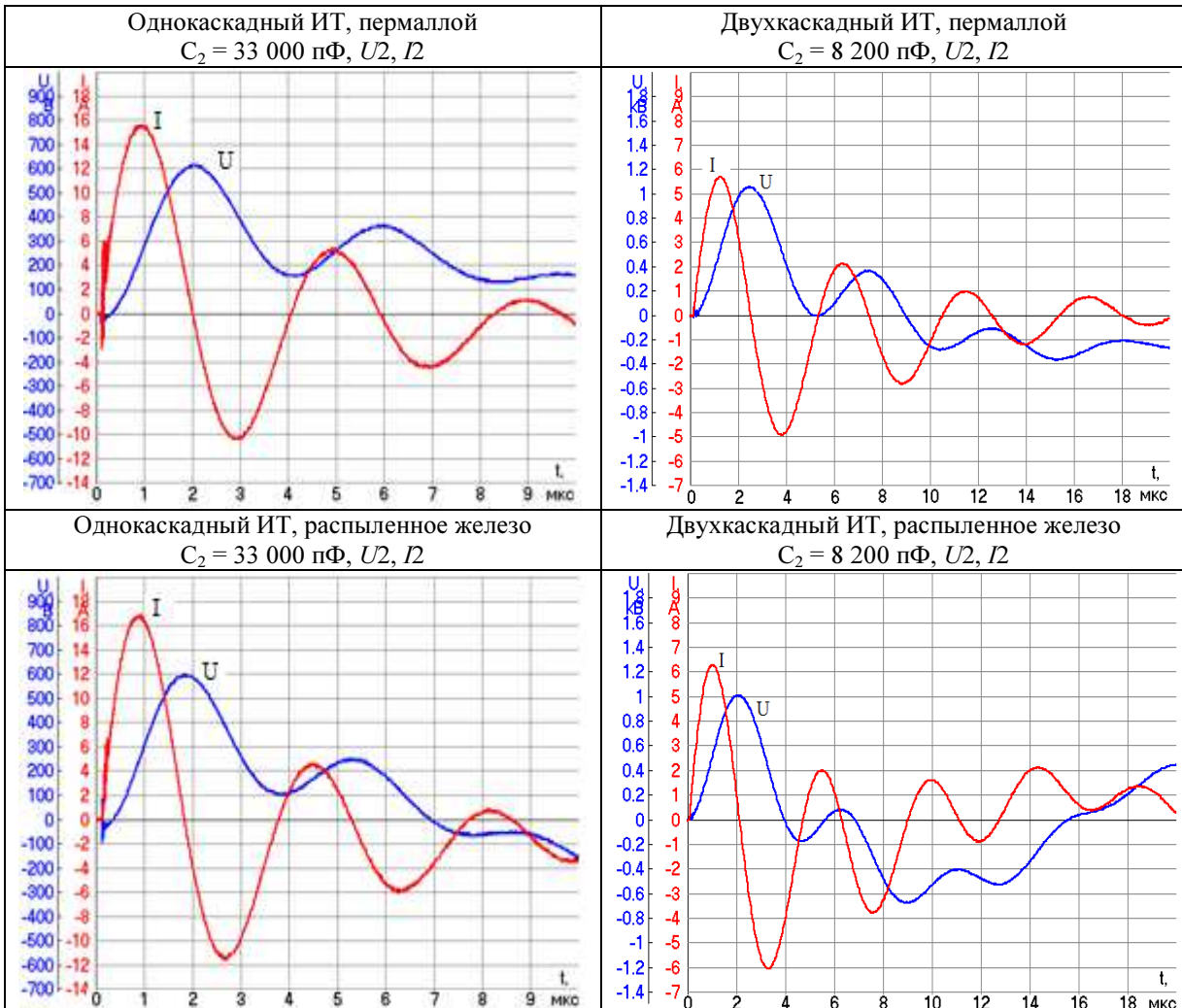


Рис. 12. Емкостная нагрузка (емкости согласованные)
 Fig. 12. The capacitive load (capacity agreed)

Выводы

Анализ полученных результатов и данных, приведенных в табл. 3–6 и рис. 10–12, позволяет сделать следующие выводы.

1. Разряд емкостного накопителя на резистивную нагрузку через ИТ.

У однокаскадных ИТ K_T возрастает с увеличением сопротивления нагрузки (табл. 3) и максимален на холостом ходу. Величина K_T несколько меньше у ИТ с сердечником из распыленного железа. Сердечники из пермаллоя в связи с малой коэрцитивной силой приходят в насыщение при сравнительно низких импульсных токах, поэтому при работе на резистивную нагрузку КПД выше у ИТ с сердечниками из распыленного железа.

У двухкаскадных ИТ эффективность крайне низкая даже при сравнительно высоких сопротивлениях нагрузки (100 Ом, табл. 4). При конструктивном $K_T = 8$ его реальная величина почти вдвое меньше из-за того, что индуктивные элементы схемы замещения образуют реактивный делитель. Поэтому применение многокаскадных схем ИТ при работе на резистивную нагрузку нецелесообразно.

2. Разряд емкостного накопителя на емкостную нагрузку через ИТ.

У однокаскадных ИТ в режиме согласования накопительной и обостряющей емкостей КПД передачи энергии в обостряющую емкость близка к 100 % (рис. 10).

У каскадных ИТ (рис. 11) результат практически такой же.

Таким образом, с учетом достоинств каскадных ИТ, их применение целесообразно в режимах перезаряда накопительных конденсаторов на обостряющую емкость в согласованных режимах. Использование сердечников из пермаллоя и распыленного железа в указанном режиме практически равноценно.

Библиографический список

1. Ицхоки Я. С. Импульсные устройства. М. : Советское Радио, 1959. С. 13–14.
2. Вдовин С. С. Проектирование импульсных трансформаторов. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1991. 208 с.
3. Матханов П. Н., Гоголицын Л. З. Расчет импульсных трансформаторов. Л. : Энергия, Ленингр. отд-ние, 1980. 112 с.
4. Cox J. Iron powder cores for switchmode power supply inductors // Micrometal Iron Powder Cores Inc., Anaheim, California, 2002. URL : <http://www.micrometals.com/appnotes/appnotedownloads/ipc4spsi.pdf>.
5. Усов А. Ф., Сёмкин Б. В., Зиновьев Н. Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. 2-е изд. Л. : ЛО Наука, 1987. 189 с.; 2000. 160 с.
6. Сёмкин Б. В., Усов А. Ф., Курец В. И. Принцип электроимпульсного разрушения материалов. Апатиты : КНЦ РАН, 1995. 276 с.
7. Усов А. Ф., Потокин А. С. Импульсное трансформирование напряжения и энергии для электроимпульсного разрушения материалов // Труды КНЦ РАН. 2014. № 7 (26). С. 40–49.

References

1. Itshoki Ya. S. Impulsnye ustroystva [Switching devices]. M. : Sovetskoe Radio, 1959. P. 13–14.
2. Vdovin S. S. Proektirovanie impulsnyh transformatorov [Design of pulse transformers]. 2-e izd., pererab. i dop. L. : Energoatomizdat, Leningr. otd-nie, 1991. 208 p.
3. Mathanov P. N., Gogolitsyn L. Z. Raschet impulsnyh transformatorov [Calculation of pulse transformers]. L. : Energiya, Leningr. otd-nie, 1980. 112 p.
4. Cox J. Iron powder cores for switchmode power supply inductors // Micrometal Iron Powder Cores Inc., Anaheim, California, 2002. URL : <http://www.micrometals.com/appnotes/appnotedownloads/ipc4spsi.pdf>.
5. Usov A. F., Syomkin B. V., Zinovev N. T. Perekhodnye protsessy v ustanovkakh elektroimpulsnoy tehnologii [Transient processes in electro-technology installations]. 2-e izd. L. : LO Nauka, 1987. 189 p.; 2000. 160 p.
6. Syomkin B. V., Usov A. F., Kurets V. I. Printsip elektroimpulsnogo razrusheniya materialov [The principle of electric pulse destruction of materials]. Apatity : KNTs RAN, 1995. 276 p.
7. Usov A. F., Potokin A. S. Impulsnoe transformirovanie napryazheniya i energii dlya elektroimpulsnogo razrusheniya materialov [Impulse voltage transformation and energy for the electric pulse destruction of materials] // Trudy KNTs RAN. 2014. N 7 (26). P. 40–49.

Сведения об авторах

Данилин Аркадий Николаевич – мкр Академгородок, 21 А, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, зав. лабораторией; e-mail: danilin@ien.kolasc.net.ru

Danilin A. N. – 21 A, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Senior Research Fellow, Head of Laboratory; e-mail: danilin@ien.kolasc.net.ru

Климов Андрей Александрович – ул. Лесная, 29, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Апатитский филиал Мурманского арктического государственного университета, студент

Klimov A. A. – 29, Lesnaya Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Apatity Branch of Murmansk Arctic State University, Student

A. N. Danilin, A. A. Klimov

**Experimental studies of characteristics of pulse transformers
with various types of magnetic conductors executed
according to the cascade scheme**

At present the theory and calculation of single-stage high-pulse transformer (PT) are well developed. Their characteristics are determined depending on the type and load parameters. However, the method of calculation of PT executed in cascade is not fully developed. The main advantage of the cascade scheme is the transfer of the insulation from the inside to the outside. Due to this electric field intensity can be reduced at the inner insulation number of times, the number of PT components in cascade. The paper presents the results of comparative experimental studies of the characteristics of single-stage and two-stage PT included in the resistive load and recharge mode capacitive storage through to PT exacerbates capacity. There are considered two types of PT with the same ratios, the number of turns of the windings and the section of magnetic cores, but different magnetic properties of the cores. The methodology of comparative research is to determine the forming properties of one- and two-stage PT schemes in the storage capacitor discharge on resistive and capacitive load across PT with following oscilloscope current and voltage at the load. Comparative studies have defined the scope of the cascade of PT schemes. The paper shows that the multi-stage schemes of PT are highly ineffective in the pulse shaping circuits on resistive load as the inductive elements of the equivalent circuits cascade PT form an inductive voltage divider. It has been shown that the cascade circuit is effective in PT overcharge mode sharpened on capacitive storage capacity in the matching mode, while the efficiency of such schemes is close to 100 %, and those positive properties possessed by the cascade circuits are realized.

Key words: pulse transformer, magnetic core, idling, short circuit, cascade connection.