Оригинальная статья / Original article
https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-64-71

Оценка характеристик импульсного сигнала при передаче по цепям с распределенными и сосредоточенными параметрами

Evaluating the properties of impulse signals transmitted over circuits with distributed and lumped parameters

Владимир П. Батраев[1], Владимир В. Батраев[1]*
Vladimir P. Batraev[1], Vladimir V. Batraev[1]*
[1]Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Российская Федерация
[1]Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIAS), Moscow, Russian Federation
**exartus@mail.ru*

Владимир П. Батраев

Владимир В. Батраев

Резюме. *Надежность железнодорожной системы автоблокировки АБТЦ-МШ всецело зависит от функциональной безопасности и устойчивости работы составляющих ее устройств, большинство из которых работает в импульсном режиме. Одними из основных компонентов устройств импульсного преобразования сигналов являются разнообразные трансформаторы и дроссели, расчет и разработка которых на практике часто затруднены в силу недостаточного учета паразитных параметров и особенностей работы этих электромагнитных систем при подмагничивании сердечника. В статье даны оценки результатов согласования электрических характеристик трансформатора с импедансами нагрузки и источника импульсного сигнала, пригодные для анализа и построения формирующих цепей и линий задержки на базе элементов с сосредоточенными параметрами.* **Цель.** *Целью работы является обоснование инженерной методики расчета длительности переднего фронта сигнала в процессе установления его уровня на выходе формирующей цепи импульсного трансформатора при согласовании с нагрузками и оценка времени задержки включения исполнительного устройства при заданном пороге срабатывания в зависимости от параметров цепи второго порядка, которая часто используется в качестве элемента обратной связи импульсных преобразователей и систем авторегулирования.* **Методы.** *Временные характеристики и форма импульса определяются для трансформатора, схема замещения которого соответствует работе изделия в диапазоне высших частот и учитывает приведенные к первичной обмотке паразитные параметры. Функция сигнала на выходе описывается согласно правилам теории линейных электрических цепей в операторной форме и после последовательно выполненных преобразований Лапласа обобщенное выражение коэффициента передачи сводится к стандартному изображению для цепи второго порядка. Аналитическое решение найдено через определение значений нулей и полюсов функции на комплексной плоскости, как корней квадратного уравнения, выраженных через коэффициент затухания цепи. Приводятся графики поля зависимостей процессов установления амплитуды импульса на выходе формирующей цепи и долей выброса амплитуды от коэффициента затухания при различных соотношениях коэффициентов согласования волнового сопротивления трансформатора с импедансами нагрузки и источника импульсного сигнала. Точечные оценки длительности фронта импульса выполнены с помощью функции программирования Mathcad и с учетом размерности матриц типа TRUE/FALSE, отражающих переход от нуля к единице. Это позволяет предложить линейные аппроксимации зависимостей длительности на заданном интервале с одной точкой перегиба, соответствующей условию полного согласования всех сопротивлений. Приводятся сведения по отклонению аппроксимации от расчетных данных, задержки срабатывания исполнительного устройства по порогу и обсуждение допустимости представления распределенных параметров в виде сосредоточенных элементов при реализации искусственных линий задержки и цепей более высокого порядка.* **Результаты. Выводы**. *Поставленная цель достигается формированием однозначной расчетной зависимости, связывающей длительность фронта сигнала с коэффициентом передачи исследуемой цепи второго порядка. Обоснованность метода получения зависимости основывается на представлении описания выходного сигнала импульсного трансформатора в общем виде, последующем анализе выражения и получением точного аналитического решения с учетом принятых к рассмотрению основных паразитных параметров трансформатора и величин нагрузки.*

Abstract. *The dependability of the ABTC-MSh automatic block system entirely depends on the functional safety and operational stability of its component devices, most of which operate in pulse mode. One of the key components of pulse signal converters is various transformers and chokes,*

whose calculation and development is, in practice, often difficult due to insufficient consideration of stray parameters and operational specificity of such electromagnetic systems when the core is magnetized. The paper estimates the results of coordination of the transformer's electrical characteristics with the load impedance and that of the pulse signal source suitable for analysing and constructing signal-shaping networks and delay lines based on lumped elements. **Aim.** *The aim of the work is to substantiate an engineering technique for calculating the duration of the leading edge of a signal in the process of setting its level at the output of the forming circuit of a pulse transformer when matching with loads and estimating the delay time for switching on the actuator at a given response threshold, depending on the parameters of the second-order circuit, which is often used as a feedback element of pulse converters and auto-regulation systems.* **Methods.** *The time characteristics and pulse form are determined for a transformer whose equivalent circuit corresponds to the item's operation in high frequencies and takes into account the stray parameters normalized to to the primary side. The output signal function is described in accordance with the linear electric circuit theory in operator form and, after a series of Laplace transformations, the generalized expression of the transmission factor is reduced to a standard form for a second-order circuit. The analytical solution was found by determining the values of the zeros and poles of the function on the plane of complex numbers as roots of quadratic equations expressed in terms of the coefficient of circuit damping. Graphs of the field dependences of the processes of establishing the pulse amplitude at the output of the forming circuit and the proportions of the amplitude outlier on the attenuation coefficient are given for various ratios of the coefficients of matching the transformer wave resistance with the load impedances and the pulse signal source. Point estimates of the pulse edge duration are made using the Mathcad programming function and taking into account the dimension of TRUE/FALSE matrices that reflect the transition from zero to one. This allows proposing linear approximations of the duration dependences within the given interval with a single inflection point that corresponds to the condition of complete matching of all resistances. Information is provided on the deviation of the approximation from the calculated data, the delay time of the actuator by the threshold. It is also discussed whether it is admissible to represent distributed parameters in the form of lumped elements while implementing artificial delay lines and higher-order circuits.* **Results. Conclusions.** *The specified problem is resolved by defining a unique calculated dependence that associates the signal edge duration to the transmission coefficient of the examined second-order circuit. The validity of the method for dependence deduction is based on describing the output signal of a pulse transformer in a general form, subsequent analysis of the expression and deduction of an accurate analytical solution, taking into account the primary stray parameters of the transformer and load values.*

Ключевые слова: *переходный процесс, импульсный сигнал, расчет трансформатора, цепи согласования, инженерная методика.*
Keywords: *transient process, impulse signal, transformer design, matching network, engineering practice.*

Для цитирования: *Батраев В.П., Батраев В.В. Оценка характеристик импульсного сигнала при передаче по цепям с распределенными и сосредоточенными параметрами // Надежность. 2022. №2. С. 64-71. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-64-71*
For citation: *Batraev V.P., Batraev V.V. Evaluating the properties of impulse signals transmitted over circuits with distributed and lumped parameters. Dependability 2022;2: 64-71. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-64-71*

Поступила *08.02.2022 г.* / **После доработки** *28.03.2022 г.* / **К печати** *17.06.2022 г.*
Received on: *08.02.2022* / **Revised on:** *28.03.2022* / **For printing:** *17.06.2022.*

Введение

Одними из основных компонентов тракта приема локомотивных сигналов являются разнообразные трансформаторы и дроссели, расчет и разработка которых на практике часто затруднены в силу недостаточного учета паразитных параметров и особенностей работы этих электромагнитных систем при несимметричном подмагничивании сердечника. Как следствие, возникают трудности по обеспечению стабильных временных и амплитудных характеристик импульсов, согласованию составных частей и узлов устройства при изменении характера и величины нагрузок, доли нелинейных искажений сигналов в диапазоне рабочих частот и уровню помехоэмиссии за его пределами, температурному режиму и т.д. В качестве примера на рис. 1 представлена осциллограмма выходного импульса трансформатора обратноходового преобразователя с характерными искажениями, которые обусловлены некоторыми из перечисленных выше причин.

Обзор источников

Известен ряд публикаций по данной тематике [1–6], в том числе рекомендации по учету влияния

Рис. 1. Искажения импульса обратноходового преобразователя

изменяющихся параметров импульсных преобразователей и трансформаторов [7–9], методам их машинного и аналитического расчета [10–13]. На практике же конечный результат часто достигается в ходе итерационного цикла, что занимает большое количество времени, а полученное решение может не только иметь существенную погрешность, но и может быть несостоятельным в случае изменения условий работы проектируемого оборудования. Данное обстоятельство характеризует как актуальность затронутой темы, так и целесообразность разработки методик для инженерных расчетов импульсных трансформаторов и дросселей на основе сознательно вводимых, но теоретически обоснованных критериев и ограничений.

Методика

Временные характеристики и форму импульса удобно определить на основании анализа эквивалентной схемы электромагнитной системы в соответствии с исследуемым частотным диапазоном работы изделия. Известные схемы замещения трансформатора представлены на рис. 2, где Z_i, $Z'_{\text{Н}}$ – внутреннее сопротивление источника ЭДС и приведенное к первичной обмотке сопротивление нагрузки, r_1, L_1 – активное сопротивление и индуктивность первичной обмотки, $r_{\text{П}}$ – сопротивление потерь изоляции и сердечника, r'_2, L_S, C'_0 – приведенные к первичной обмотке активное сопротивление, индуктивность рассеяния, собственная емкость трансформатора и емкость нагрузки [1].

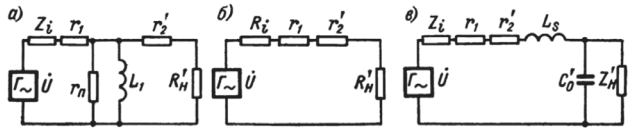

Рис. 2. Схемы замещения трансформатора для различных участков частотного диапазона:
а) – для нижних частот; б) – для средних частот;
в) – для высоких частот.

Учет потерь в результате магнитных процессов в сердечнике требует отдельного рассмотрения и на данном этапе анализ характеристик импульса выполним только по электрическим параметрам цепи второго порядка (рис. 2в), функция передачи которой в операторной форме будет иметь вид [14, 15]

$$\frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \left(p^2 \cdot L_S \cdot C'_0 + p \cdot \left(Z_{\text{г}} \cdot C'_0 + \frac{L_S}{Z'_{\text{Н}}} \right) + \frac{Z_{\text{г}}}{Z'_{\text{Н}}} + 1 \right)^{-1},$$

где $Z_{\text{г}} = Z_i + r_1 + r'_2$ – общий импеданс со стороны источника, как генератора сигнала.

Решение найдем через определение значения нулей и полюсов функции, как корней квадратного уравнения, определяющих характер переходного процесса.

$$p^2 A + pB + C = 0. \quad (1)$$

Если выполнить замену переменной согласно теореме подобия преобразований Лапласа,

$$F(q) = F(pb) = \frac{1}{b} F\left(\frac{t}{b}\right) \text{ при } b = \sqrt{A/C},$$

то обобщенное выражение функции передачи при воздействующем сигнале может быть сведено к стандартному изображению:

$$\frac{U_2(q)}{U_1(q)} = \left[C \cdot \left(q^2 + 2 \cdot q \cdot a + 1 \right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где $a = B \cdot (2 \cdot \sqrt{AC})^{-1}$ – коэффициент затухания переходного процесса;

$T = t \cdot \sqrt{C/A}$ – новая переменная во временной области.

Задав входное воздействие в виде ступенчатой ЭДС и проведя соответствующие преобразования, получим следующее изображение функции выходного напряжения:

$$U_2(q) = \left[q_0 (q - q_1)(q - q_2) \right]^{-1}.$$

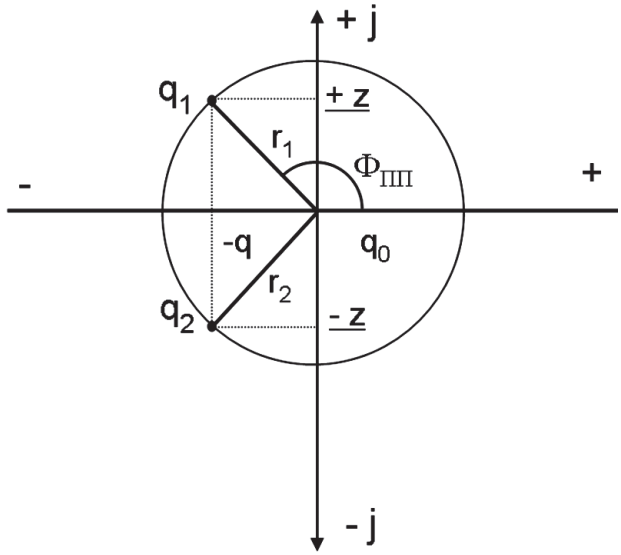

Рис. 3. Годограф функции на комплексной плоскости при $a < 1$

Нулей у данной функции нет, а полюсами являются корни уравнения:

$$q_0=0;\ q_{1;2}=-a\pm\sqrt{a^2-1}.$$

При $a<1$ положение полюсов на комплексной плоскости соответствует рис. 3, а оригинал отображает колебательный процесс, который затухает по экспоненте [15]

$$U_2(T)=1+\frac{e^{-aT}}{z\cdot r}\mathrm{Sin}(zT-\Phi_{\text{пп}}),$$

где $q_{1;2}=-a\pm \mathrm{j}\,z$ – комплексно-сопряженные корни при $z=\sqrt{1-a^2}$;

$r=r_1^2$ – произведение расстояний от полюса q_0 до полюса q_1 и обратно.

Используя формулы приведения, сложения и преобразования тригонометрических функций, получим

$$\mathrm{Sin}\ (zT-\Phi_{\text{пп}})=-\left(\frac{a}{r_1}\mathrm{Sin}\ zT+\frac{z}{r_1}\mathrm{Cos}\ zT\right),$$

а учитывая, что радиус r_1=1, окончательно имеем

$$U_2(T)=1-e^{-aT}\left(\frac{a}{\sqrt{1-a^2}}Sin\sqrt{1-a^2}T+Cos\sqrt{1-a^2}T\right). \quad (3)$$

При $a>1$ положение полюсов на комплексной плоскости соответствует рис. 4, а оригинал отображает апериодический затухающий процесс

$$U_2(T)=1+\frac{e^{q_1T}}{(r_{01})\cdot(-r_{21})}+\frac{e^{q_2T}}{(r_{02})\cdot(r_{12})},$$

где $q_{1;2}=-a\pm z$ – действительные корни при $z=\sqrt{a^2-1}$;

$(r_{ik})\cdot(r_{jk})$ – произведение расстояний от каждого i- и j-полюса до исследуемого k-полюса, причем $(r_{01})\cdot(r_{-21})=q_1\cdot(q_1-q_2)$; $(r_{02})\cdot(r_{12})=q_2\cdot(q_2-q_1)$.

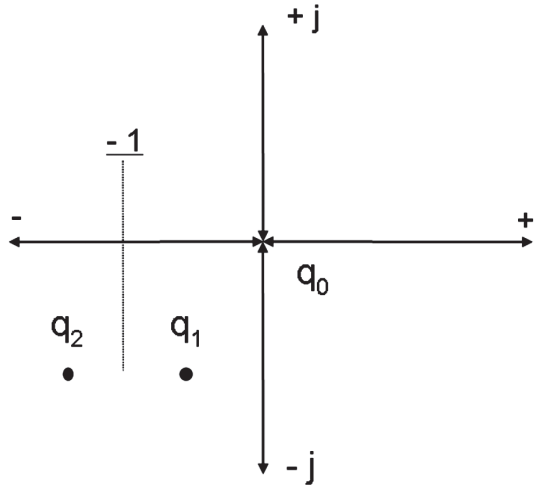

Рис. 4. Положение полюсов при $a>1$

Используя свойства гиперболических функций, после преобразований получим:

$$U_2(T)=1-e^{-aT}\left(\frac{a}{\sqrt{a^2-1}}\mathrm{Sh}\sqrt{a^2-1}\ \cdot T+\mathrm{Ch}\sqrt{a^2-1}\cdot T\right) \quad (4)$$

Следует отметить, что поскольку формулы (3) и (4) описывают один и тот же процесс, то они применимы для любых значений коэффициента затухания, но наиболее простые вычисления могут быть получены при указанных выше ограничениях.

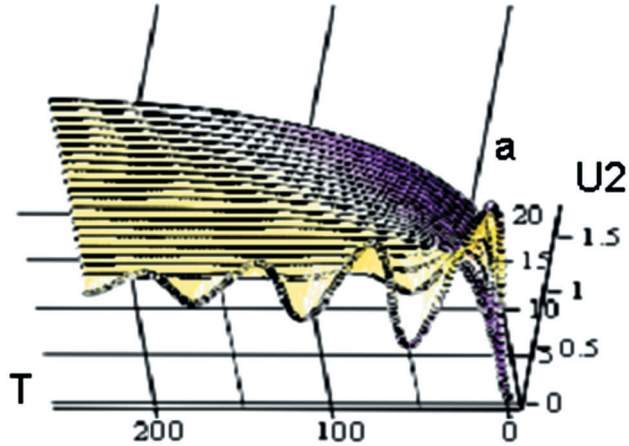

Рис. 5. Поле зависимостей процессов установления амплитуды импульса

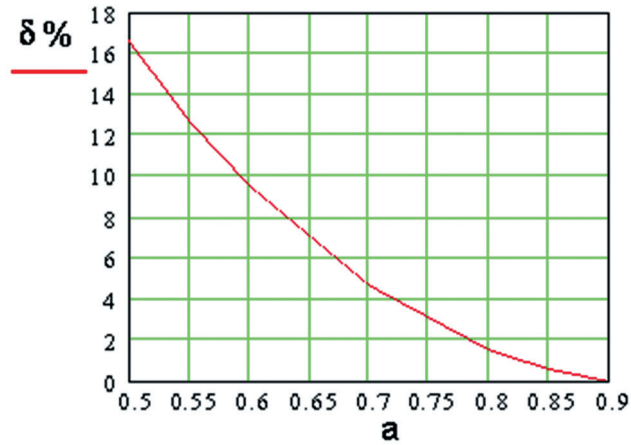

Рис. 6. Выброс амплитуды импульса от величины коэффициента затухания

Решения являются точными для любых цепей второго порядка с сосредоточенными параметрами, на величины которых никакие ограничения не были наложены. Это позволяет распространить полученные результаты и на анализ переходных процессов при передаче импульсов по элементам *искусственных формирующих цепей* и *линий задержки*, для которых еще допустимо представление распределенных параметров в виде сосредоточенных [15, 16]. На рис. 5 и рис. 6 приведены графики поля зависимостей установления амплитуды импульса и величины выброса амплитуды.

Очевидно, что цепи более высокого порядка могут иметь и более сложный колебательный процесс за время установления амплитуды импульса. Качественный анализ цепи третьего порядка показал [17] наличие дополнительного колебания по переднему фронту им-

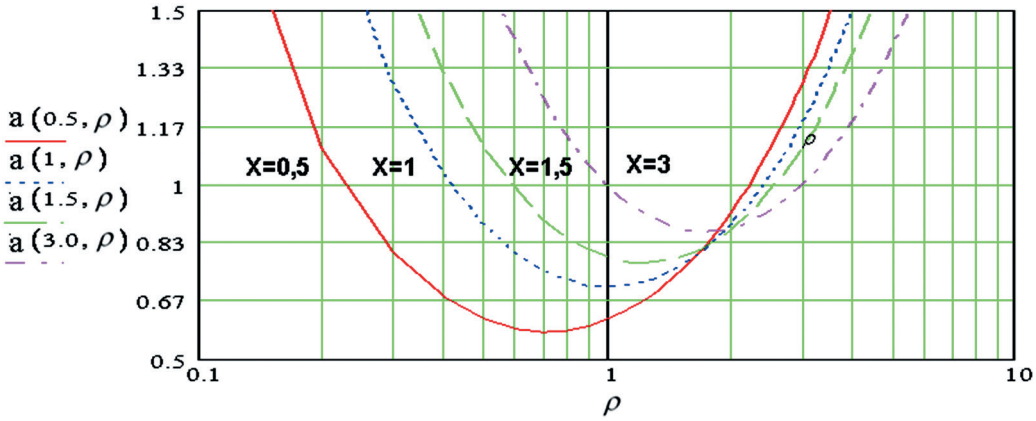

Рис. 7. Зависимость коэффициента затухания от соотношений импедансов схемы

пульса, однако полученные трансцендентные уравнения исключили возможность установления однозначных зависимостей частоты, уровня и характера изменения процесса от соотношения параметров элементов цепи. Тем не менее, критической точкой возможности возникновения колебательного режима в цепи третьего порядка предлагается считать величину выброса до 4% при предельном значении 10–15% , обычно допускаемых при построении импульсных преобразователей и систем авторегулирования с цепями второго порядка в качестве элементов обратной связи.

Оценку влияния степени согласования импедансов генератора, волнового сопротивления цепи и нагрузки на величину коэффициента затухания выполним подстановкой в (2) значений коэффициентов *A*, *B*, *C* из выражения (1):

$$a = \frac{0,5}{\sqrt{1+x}} \cdot \left(\rho + \frac{x}{\rho}\right), \qquad (5)$$

где $x=Z_г/Z_H$; $\rho=Z_B/Z_H$ – коэффициенты согласования.

График зависимости приведен на рис. 7.

В сравнении с графиком рис. 6 можно видеть, что даже при полном согласовании $x=\rho=1$ выброс амплитуды имеет место, а его величина не менее 4,5%. Как следует из (5), например, для любого сочетания волнового сопротивления цепи и нагрузки $\rho>0$ существует строго определенное значение импеданса генератора сигнала, при котором величина выброса может быть минимизирована

$T_{21} - T_3 = 1.8$

Q =

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0
2	1	1	1	1	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	0	0	0
4	1	1	1	1	1	0	0	0
5	1	1	1	1	1	0	0	0
6	1	1	1	1	1	0	0	0
7	1	1	1	1	1	0	0	0
8	1	1	1	1	1	1	0	0

$a_2 = 0.5$

G =

	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

M =

	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
0	1.258	1.331	1.399	1.462	1.52	1.57	1.615	1.652	1.682	1.705	1.72
1	1.019	1.071	1.12	1.165	1.205	1.241	1.273	1.3	1.323	1.342	1.355
2	0.849	0.89	0.928	0.963	0.994	1.023	1.049	1.072	1.092	1.11	1.124
3	0.726	0.759	0.79	0.819	0.846	0.871	0.893	0.914	0.933	0.95	0.965
4	0.632	0.661	0.687	0.712	0.736	0.758	0.779	0.798	0.816	0.833	0.849
5	0.56	0.585	0.608	0.631	0.652	0.672	0.692	0.71	0.727	0.743	0.759
6	0.502	0.525	0.546	0.566	0.586	0.605	0.623	0.64	0.656	0.672	0.687
7	0.456	0.476	0.495	0.514	0.532	0.55	0.566	0.583	0.598	0.613	0.628
8	0.417	0.435	0.453	0.471	0.488	0.504	0.52	0.535	0.55	0.565	0.578

Рис. 8. Фрагменты исходной матрицы поля зависимостей установления амплитуд импульса

```
q := | for i ∈ 0..20
     |   | for j ∈ 0..249
     |   |   if (Q_{i,j} = 1) ∧ (Q_{i,j+1} = 0)
     |   |     | (tempq ← j)
     |   |     | break
     |   | temp2q_i ← tempq
     | return temp2q

g := | for i ∈ 0..20
     |   | for j ∈ 0..249
     |   |   if (G_{i,j} = 0) ∧ (G_{i,j+1} = 1)
     |   |     | (tempg ← j + 1)
     |   |     | break
     |   | temp2g_i ← tempg
     | return temp2g

time:= | for temptime ∈ 0..20
       |   | timeresult ← T(g_temptime) − T(q_temptime)
       |   | result_temptime ← timeresult
       | return result
```

$time^T =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	1.2	1.4	1.8	2.2	3	4	5	6	6.9	7.8	8.8	9.8	10.6	11.5

Рис. 9. Код программы для среды MathCad

на заданном уровне, а для ρ>2 колебания не возникают уже при любых значениях $x \geq 0{,}5$. Для практики это означает, что последовательные этапы конструктивной доработки и перемотки трансформатора с целью уменьшения выброса в ряде случаев могут быть заменены на упрощенный этап подбора величины сопротивления в цепи передачи. Это позволяет при известной частоте колебательного процесса достаточно просто определить значения коэффициентов x, ρ, оценить добротность, величины паразитных параметров цепи и внести поправки в исходные расчетные соотношения применительно к данной схеме.

Длительность фронта импульса на интервале времени установления амплитуды от уровня 0,1 до 0,9 удобно определить по разности номеров столбцов матриц типа TRUE/FALSE $Q_{i,j}=0{,}1 \geq M_{i,j}$ и $G_{i,j}=0{,}9 \leq M_{i,j}$, которые отражают переход значений матриц от нуля к единице. В качестве иллюстрации этого способа ниже (рис. 8) приведены фрагменты исходной матрицы поля зависимостей установления амплитуд импульса $M_{i,j} = U2(a_i, T_j)$ при $i = 0...20\, a_i = 0{,}1 + 0{,}2 \cdot i;\ j = 0...250;\ T_j = 0{,}1 + 0{,}1 \cdot j$ и матриц $Q_{i,j}$, $G_{i,j}$, позволяющих выполнить расчет, например, для значения a=0,5.

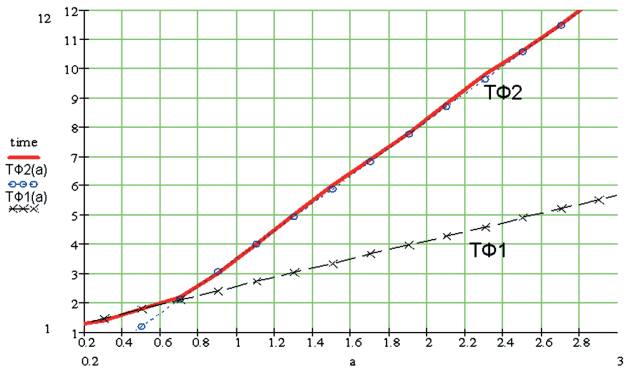

Рис. 10. Длительность переднего фронта импульса цепи второго порядка в зависимости от величины коэффициента затухания

Для автоматизации получения информации о длительности переднего фронта импульсов при любой форме переходного процесса можно воспользоваться функциями программирования Mathcad. На рис. 10 приведена зависимость относительной длительности переднего фронта, построенная по результатам расчета по программе на рис. 9.

График достаточно хорошо аппроксимируется двумя линейными зависимостями

$$T_{ФР1} = 1{,}56 \cdot a + 1{,}0 \text{ при } a \leq 0{,}7;$$

$$T_{ФР2} = 4{,}68 \cdot a - 1{,}14 \text{ при } a \geq 0{,}7,$$

уточняет результаты [11, 15, 17], а отклонения зависимостей от расчетной кривой не превосходят значений указанных на рис. 11.

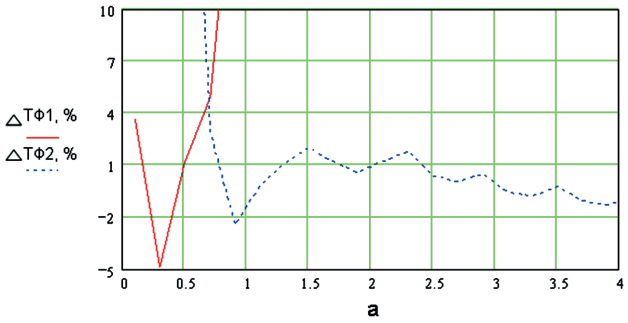

Рис. 11 Погрешность аппроксимации длительности переднего фронта импульса

Аналогичным образом определяется число дроблений и их длительность на заданном пороге исследования переднего фронта импульса. В частности, задержка срабатывания исполнительного устройства, вычисленная для порога по критерию «идеального наблюдателя», также может быть представлена в виде двух аппроксимаций:

$T_З = 0{,}6 \cdot a + 0{,}6$ при $0{,}1 \leq a \leq 1{,}5$,

$T_З = 1{,}15 \cdot a$ при $1{,}0 \leq a \leq 4{,}0$.

В общем случае характер заднего фронта импульса аналогичен переднему, но применительно к конкретному

случаю рис. 1 он указывает на работу трансформатора преобразователя в режиме прерывистого магнитного потока (разрывного тока), когда вся запасенная энергия уже передана в нагрузку и следующий цикл будет начинаться с нулевого значения тока. При этом за счет индуктивности намагничивания трансформатора и суммарной емкости цепи обязательно возникают низкочастотные колебания с частотой

$$f = \left(2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_0'}\right)^{-1}.$$

Для заданной выходной мощности $P_{\text{вых}}$ колебания могут быть устранены только при переводе трансформатора в режим непрерывного магнитного потока (безразрывных токов) путем существенного увеличения индуктивности первичной обмотки или уменьшением периода следования импульсов T_0 при неизменной длительности $t_{\text{имп}}$ прямого хода:

$$I_1 = \left[2 \cdot P_{\text{вых}} \cdot T_0 \left(\eta \cdot L_1\right)^{-1}\right]^{-0,5},$$

$$L_1 = \left(U_1 \cdot t_{\text{имп}}\right)^2 \cdot \left(2 \cdot P_{\text{вых}} \cdot T_0\right)^{-1}.$$

Базовыми соотношениями в этом случае выступают необходимая величина тока и индуктивность первичной обмотки, но это уже относится к элементам расчета схемы преобразователя и выходит за рамки обсуждаемой задачи.

Заключение

В заключение стоит отметить, что оптимизация временных и амплитудных характеристик импульса на выходе трансформатора достигается в результате сознательного компромисса между электрическими, конструктивными и технико-экономическими показателями, которыми руководствуется разработчик при проектировании. Попытка привести все параметры к идеальным значениям затруднена, поскольку улучшение одного параметра ведет к ухудшению сразу нескольких других: уменьшение паразитной емкости путем секционирования обмоток увеличивает габариты и сложность изготовления изделия, а выравнивание формы импульса за счет повышения индуктивности намагничивания ведет к росту индуктивности рассеяния и активного сопротивление обмотки и т.п.

Выводы

Методика определения временных характеристик переходного процесса на заданном пороге анализа и полученные в работе соотношения позволяют установить требования к электрическим параметрам трансформатора, при которых обеспечиваются условия минимума искажений импульса на его выходе.

Библиографический список

1. Русин Ю.С. Трансформаторы звуковой и ультразвуковой частоты. Л.: Энергия, 1973. 152 с.

2. Philips Semiconductors. Design of HF wideband power transformers // Application Note ECO6907, 1998. 23 p.

3. Philips Semiconductors. Design of H.F. Wideband Power Transformers, Part II // Application Note ECO7213, 1998. 10 p.

4. Ковалев Н. Применение широкополосных трансформаторов в радиоэлектронной аппаратуре // Компоненты и технология. 2005. № 2. С. 36-38.

5. Зееман С., Осипов А., Сандырев О. Особенности работы высокочастотного трансформатора в схеме последовательного резонансного инвертора // Силовая электроника. 2007. № 1. С. 67-73.

6. Компоненты для построения источников питания. Группа компаний «Симметрон» [электронный ресурс]. URL: www.symmetron.ru/articles/brochures/SMPS.pdf (дата обращения 28.03.2022)

7. Бердников Д.В. Измерение индуктивности рассеяния в трансформаторах импульсных преобразователей с помощью LRC-метра // Современная электроника. 2006. № 8. С. 58-61.

8. Ридли Р. Измерение импеданса трансформаторов. Разработка и конструирование // Электронные компоненты. 2011. №12. С. 10-11.

9. ОСТ4-473.002-78. Трансформаторы сигнальные и дроссели аппаратуры связи. Методы измерения основных параметров.

10. Расчет и моделирование повышающее-понижающего преобразователя напряжения // Схемотехника. 2007. № 4. С. 6-9; № 5. С. 2-6; № 6. С. 8-11; № 7. С. 9-12.

11. Матханов П.Н., Гоголицын Л.З. Расчет импульсных трансформаторов. Л.: Энергия, 1980. 112 с.

12. Кузнецов А. Трансформаторы и дроссели для импульсных источников питания // Схемотехника. 2000. № 1. С. 30-33; № 2. С. 48-49; 2001. № 1(3). С. 32-34.

13. ОСТ4-ГО.012.013. Трансформаторы для аппаратуры проводной связи. Типовой расчет.

14. Волков Е.А., Санковский Э.И., Сидорович Д.Ю. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: Учебник для вузов ж.д. транспорта. М.: Маршрут, 2005. 509 с.

15. Лэнди Р., Дэвис Д., Албрехт А. Справочник радиоинженера. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. 704 с.

16. Справочник по радиоэлектронике в трех томах: Т. 1 / Под ред. А.А. Куликовского. М.: Энергия, 1967. 640 с.

17. Каштанов В.В. Анализ фронта выходных импульсов трансформатора // Радиотехника. 1995. № 12. С. 39-40.

References

1. Rusin Yu.S. [Audio and ultrasonic frequency transformers]. Leningrad: Energiya; 1973. [in Russ.]

2. Philips Semiconductors. Design of HF wideband power transformers. Application Note ECO6907; 1998.

3. Philips Semiconductors. Design of H.F. Wideband Power Transformers, Part II. Application Note ECO7213; 1998.

4. Kovaliov N. [Application of broadband transformers in electronic equipment]. *Komponenty i tekhnologii* 2005;2:36-38. (in Russ.)

5. Zeman S., Osipov A., Sandyrev O. [Specific performance features of the high-frequency transformer in the circuit of a serial resonance inverter]. *Silovaya elektronika* 2007;1:67-73. (in Russ.)

6. Components of supply equipment. Symmetron Group. (accessed 28.03.2022). Available at: www.symmetron.ru/articles/brochures/SMPS.pdf. (in Russ.)

7. Berdnikov D.V. Measuring the leakage inductance in transformers of pulse converters using an LCR meter. *Sovremennaya elektronika* 2006;8:58-61. (in Russ.)

8. Ridley R. Measuring the impedance of transformers. *Elektronnye komponenty* 2011;12:10-11. (in Russ.)

9. [OST 4-473.002-78. Signal transformers and chokes of telecommunication equipment. Methods for measuring critical parameters]. (in Russ.)

10. [Calculation and simulation of up/down voltage converter]. *Skhemotekhnika* 2007;4:6-9;5:2-6;6:8-11;7:9-12. (in Russ.)

11. Matkhanov P.N., Gogolitsyn L.Z. Pulse transformer design. Leningrad: Energiya; 1980. (in Russ.)

12. Kuznetsov A. [Transformers and chokes for switched-mode power supplies]. *Skhemotekhnika* 2000;1:30-33;2:48-49; 2001;1(3):32-34. (in Russ.)

13. [OST 4-GO.012.013. Transformers for landline communication system. Routine calculation]. (in Russ.)

14. Volkov E.A., Sankovsky E.I., Sidorovich D.Yu. [Theory of linear electric circuits of railway automation assets: textbook for railway colleges]. Moscow: Marshrut; 2005. (in Russ.)

15. Landee R., Davis D., Albrecht A. Electronic designers' handbook. Moscow – Leningrad: Gosenergoizdat; 1961.

16. Kulikovsky A.A., editor. [Electronics handbook in three volumes. Volume 1]. Moscow: Energiya; 1967. (in Russ.)

17. Kashtanov V.V. [Analysis of the leading edge of a transformer's output pulse]. *Radiotekhnika* 1995;12:39-40. (in Russ.)

Сведения об авторах

Батраев Владимир Петрович – начальник сектора научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Российская Федерация, e-mail: v.batraev@vniias.ru

Батраев Владимир Владимирович – заместитель начальника отделения – начальник отдела научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Российская Федерация, e-mail: exartus@mail.ru

About the authors

Vladimir P. Batraev, Head of Sector, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIAS), Moscow, Russian Federation, e-mail: v.batraev@vniias.ru.

Vladimir V. Batraev, Deputy Head of Division, Head of Unit, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIAS), Moscow, Russian Federation, e-mail: exartus@mail.ru.

Вклад авторов в статью

Батраев В.П. Сформулированы принципы инженерной методики. Участие в обсуждении методов исследования и анализ полученных результатов.

Батраев В.В. На основании математического аппарата обоснована инженерная методика. Выполнение расчетов и формулирование выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.