

УДК 004.021:621.3.078

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА  
ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ  
КЛЮЧЕВОГО ЭЛЕМЕНТА И СИНТЕЗА КОРРЕКТИРУЮЩЕГО  
ЗВЕНА****В. М. ЛУКАШОВ, С. Н. КУХАРЕНКО, Ю. В. КРЫШНЕВ***Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь***Введение**

В сфере использования устройств силовой электроники и оборудования, в составе которого есть блоки, работающие с импульсными сигналами частотой выше 1 кГц (преобразователи, усилители, импульсные блоки питания, электроприводы управления двигателей), существует проблема, связанная с возникновением неконтролируемых переходных процессов в элементах схемы, которые работают в ключевом режиме. Проблема заключается в появлении затухающего колебательного процесса при переходе элемента из «нулевого» положения в «единичное» и, наоборот. Данное явление приводит к значительным энергетическим потерям, перегреву ключевых элементов и снижению качества работы устройства. Появление колебательности переходного процесса обусловлено неидеальностью элемента. Сопротивление и индуктивность выводов, наличие паразитных емкостей влияют на работу ключевого элемента и вносят в его схему замещения характеристики колебательного звена. В результате изучения существующей проблемы были рассмотрены методики статической идентификации параметров динамических объектов. Сущность методики состоит в следующем: в процессе нормального функционирования одномерного объекта синхронно измеряются входной и выходной сигналы, по результатам измерения определяется приближенное значение оператора, ставящего в однозначное соответствие выходной и входной сигналы, таким образом, получают математическую модель объекта [1]. Но задача статической идентификации некорректна вследствие отсутствия анализа условия устойчивости [1]. В качестве примера были рассмотрены методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов, изучен расчет параметров модели Гуммеля–Пуна биполярного транзистора [2]. Актуальность разработки методик для идентификации параметров динамических объектов подтверждается широким обсуждением данной тематики в современных научных работах.

**Постановка задачи**

Задачей данного исследования является разработка пользовательской программы, которая позволит идентифицировать параметры (сопротивление, индуктивность и емкость) схемы замещения ключевого элемента и осуществить синтез корректирующего звена. Включение параллельно исследуемому элементу корректирующего звена значительно улучшит характеристики переходного процесса, а именно: ограничит амплитуду выбросов, снизит энергетические потери, исключит перегрев ключевого элемента и повысит качественные показатели работы устройства (уменьшит коэффициент пульсаций в блоках питания, снизит энергопотребление устройства и уровень шума информационных сигналов внутри устройства).

**Сущность метода идентификации параметров схемы замещения ключевого элемента**

Схема замещения ключевого элемента представляет собой последовательный  $RLC$ -контур, изображенный на рис. 1.

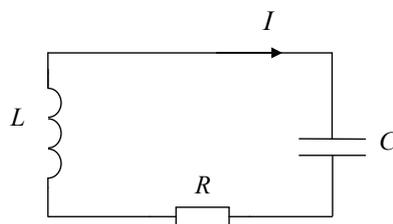


Рис. 1. Схема замещения ключевого элемента

Уравнение напряжений для последовательного  $RLC$ -контра будет иметь вид:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = 0, \quad (1)$$

где  $q$  – заряд на конденсаторе.

Для анализа колебательного процесса уравнение (1) можно представить в виде:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = 0. \quad (2)$$

Под  $x$  подразумевается заряд конденсатора, а  $\delta = \frac{R}{2L}$  – коэффициент затухания;

$\omega^2 = \frac{1}{LC}$  – угловая частота собственных колебаний.

Уравнение (2) есть уравнение затухающих колебаний и его общее решение имеет вид

$$x = D e^{-\delta t} \cos(\omega_1 t - \alpha), \quad (3)$$

где  $D$  и  $\alpha$  – константы, зависящие от начальных условий;

$$\omega_1^2 = \omega^2 - \delta^2. \quad (4)$$

Коэффициент затухания и угловую частоту собственных колебаний можно определить, зафиксировав амплитуды и моменты времени двух максимумов (рис. 2).

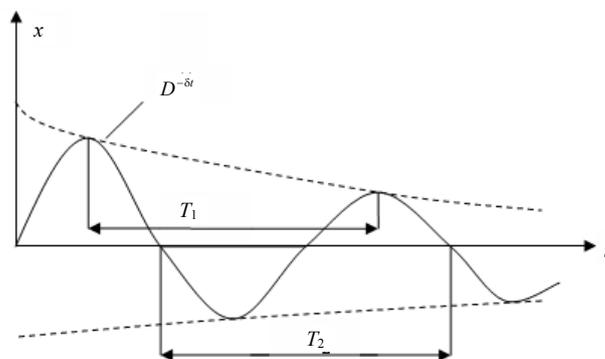


Рис. 2. Два максимума колебательного процесса

В момент максимумов колебаний косинус уравнения затухающих колебаний (3) будет иметь максимальное значение, равное 1, и поэтому уравнения затухающих колебаний для двух последовательных максимумов будут иметь вид [3]:

$$x_1 = De^{-\delta t}; \tag{5}$$

$$x_2 = De^{-\delta(t+T)}, \tag{6}$$

где  $T$  – период колебаний.

$$T = t_{\max 2} - t_{\max 1}. \tag{7}$$

Из этих двух выражений можно выразить коэффициент затухания:

$$\delta = \frac{1}{T} \ln \left( \frac{x_1}{x_2} \right). \tag{8}$$

Амплитуду  $D$  можно выразить из уравнения (5):

$$D = x_1 e^{\delta t}. \tag{9}$$

Начальная фаза колебания определяется по формуле

$$\alpha = \arccos \left( \frac{x_0}{D} \right), \tag{10}$$

где  $x_0$  – значение напряжения в начальный момент времени.

Угловая частота  $\omega_1$  равна:

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T}. \tag{11}$$

Угловая частота  $\omega$  равна:

$$\omega = \sqrt{\omega_1^2 + \delta^2}. \tag{12}$$

Для идентификации параметров схемы замещения необходимо параллельно исследуемому элементу включить емкость  $C_{\text{доп}}$  (рис. 3).

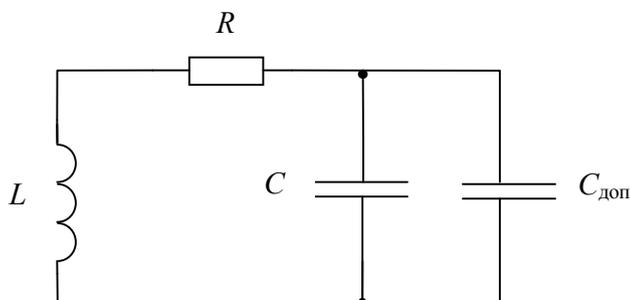


Рис. 3. Схема замещения исследуемого элемента с параллельно включенной дополнительной емкостью  $C_{\text{доп}}$

После включения дополнительной емкости  $C_{\text{доп}}$  уравнение угловой частоты примет вид:

$$\omega_2^2 = \frac{1}{L(C + C_{\text{доп}})}. \quad (13)$$

После решения системы уравнений (уравнения (2) и (13)) относительно  $R$ ,  $L$  и  $C$ , зная значения двух угловых частот, двух коэффициентов затухания и дополнительной емкости, можно найти необходимые нам параметры:

$$L = \left( \frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega^2} \right) \frac{1}{C_{\text{доп}}}; \quad (14)$$

$$C = \frac{1}{L\omega^2}; \quad (15)$$

$$R = 2\delta L. \quad (16)$$

Волновое сопротивление схемы замещения равно:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (17)$$

#### Синтез корректирующего звена

Для корректировки переходного процесса необходимо включить параллельно исследуемому элементу корректирующее звено  $R_{\text{доп}}C_{\text{доп}}$  (рис. 4).

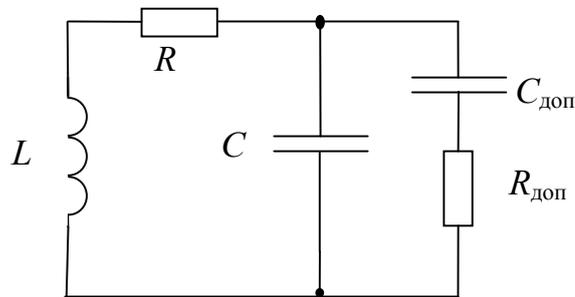


Рис. 4. Схема замещения исследуемого элемента с параллельно включенным корректирующим звеном  $R_{\text{доп}}C_{\text{доп}}$

Характеристическое уравнение для данного контура имеет вид:

$$p^3 L C R_{\text{доп}} C_{\text{доп}} + p^2 (L C_{\text{доп}} + L C + R C R_{\text{доп}} C_{\text{доп}}) + p (R C_{\text{доп}} + R_{\text{доп}} C_{\text{доп}} + R C) + 1 = 0. \quad (18)$$

Для удобства расчетов был введен коэффициент нормирования Вышнеградского:

$$K_B = \sqrt[3]{\frac{1}{L C R_{\text{доп}} C_{\text{доп}}}}. \quad (19)$$

Характеристическое уравнение можно записать в виде:

$$p^3 + p^2 A_2 + p A_1 + A_0 = 0. \quad (20)$$

Коэффициенты характеристического уравнения равны:

$$\begin{cases} A2 = \frac{LC + LC_{\text{доп}} + RCR_{\text{доп}}C_{\text{доп}}}{LCR_{\text{доп}}C_{\text{доп}}}; \\ A1 = \frac{RC_{\text{доп}} + R_{\text{доп}}C_{\text{доп}} + RC}{LCR_{\text{доп}}C_{\text{доп}}}; \\ A0 = \frac{1}{LCR_{\text{доп}}C_{\text{доп}}}. \end{cases} \quad (21)$$

Перебором значений коэффициента Вышнеградского осуществляется поиск оптимального варианта переходного процесса по критерию минимума энергетических потерь [4].

Зависимость коэффициента  $A0$  от коэффициента Вышнеградского:

$$A0 = K_B^3. \quad (22)$$

Значение дополнительного сопротивления принимается равным волновому:

$$R_{\text{доп}} = \rho.$$

Из системы (21) получено выражение значения дополнительной емкости:

$$C_{\text{доп}} = \frac{1}{LCR_{\text{доп}}A0}. \quad (23)$$

Значения коэффициентов  $A1$  и  $A2$  рассчитываются по уравнениям системы (21). Решение характеристического уравнения будет иметь вид:

$$U(t) = De^{-\delta_1 t} \cos(\omega t - \alpha) + Ce^{-\delta_2 t}. \quad (24)$$

Путем решения кубического уравнения находятся корни этого характеристического уравнения. Постоянные  $D$ ,  $C$ ,  $\alpha$  рассчитаны, исходя из начальных условий.

Для определения значений элементов корректирующего звена необходимо ввести критерий, характеризующий отношение энергетических потерь в исходном процессе и в скорректированном. Наиболее точно колебательность процесса отразит средневыпрямленное напряжение. Так как колебательный процесс затухающий, то целесообразно рассчитать средневыпрямленное напряжение на промежутке времени, равном 1000 периодам. Формула для средневыпрямленного напряжения имеет вид:

$$U_{\text{cp}} = \frac{\int_0^{1000T} |U(t)| dt}{1000T}. \quad (25)$$

Средневыпрямленное напряжение можно отождествлять с энергетическими потерями процесса. Вводимый критерий  $\Delta$  будет представлять отношение средневыпрямленного напряжения исходного переходного процесса к средневыпрямленному напряжению скорректированного процесса:

$$\Delta = \frac{\int_0^{1000T} |U_{\text{исх}}(t)| dt}{1000T} \cdot \frac{1000T}{\int_0^{1000T} |U_{\text{кор}}(t)| dt}, \quad (26)$$

где  $U_{\text{исх}}(t)$  – исходный переходной процесс;  $U_{\text{кор}}(t)$  – скорректированный переходной процесс;  $T$  – период одного колебания.

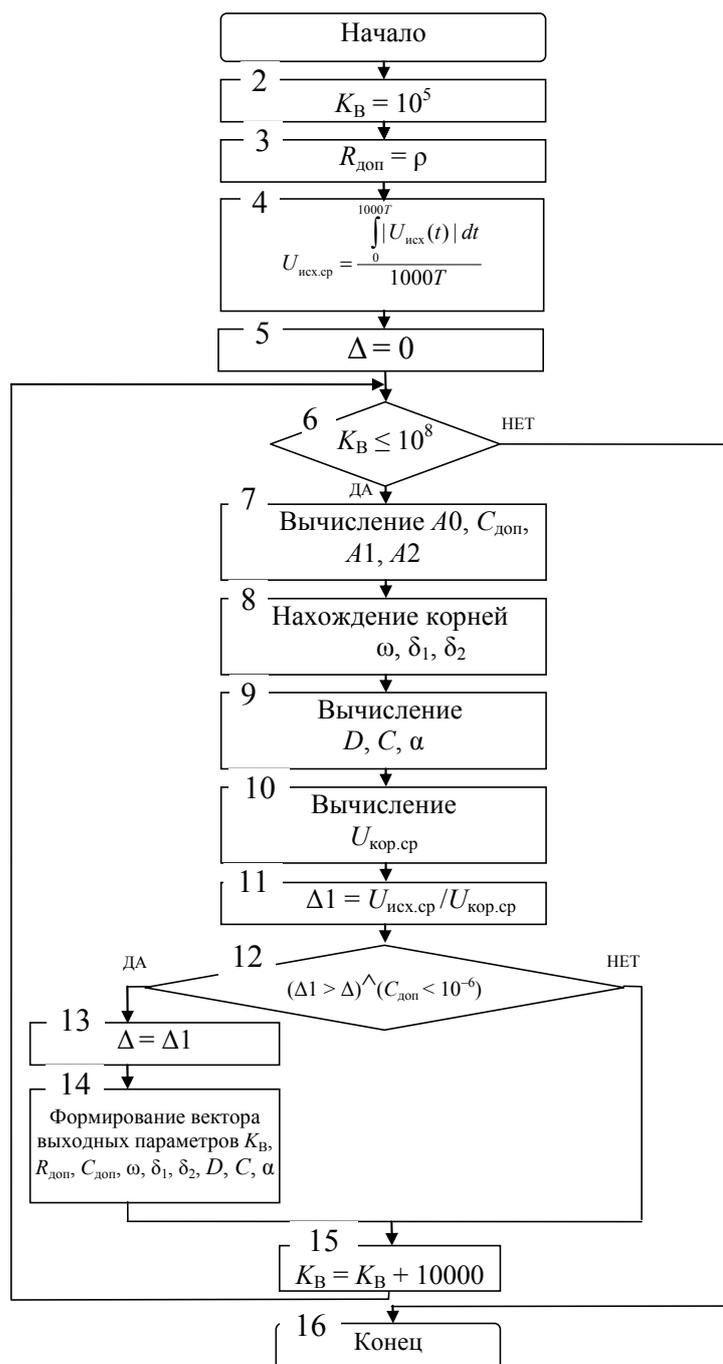


Рис. 5. Графическая схема алгоритма

Разработан алгоритм, который, исходя из учета данного критерия, перебирает варианты корректировки процесса и выбирает тот, где значение данного критерия максимально. Алгоритм выводит значение коэффициента Вышнеградского, значение критерия и параметров элементов демпфирующей цепи для лучшего варианта корректировки исходного процесса (рис. 5).

### Методика работы с предложенной программой «Идентификация параметров схемы замещения и синтез корректирующего звена»

1. При помощи осциллографа исследовать переходной процесс на ключевом элементе. Для этого необходимо колебательную затухающую кривую сместить в центр так, чтобы ось времени была относительной «осью симметрии» переходного процесса (рис. 6). Координаты первого и второго максимума переходного процесса следует занести в программу (рис. 8).

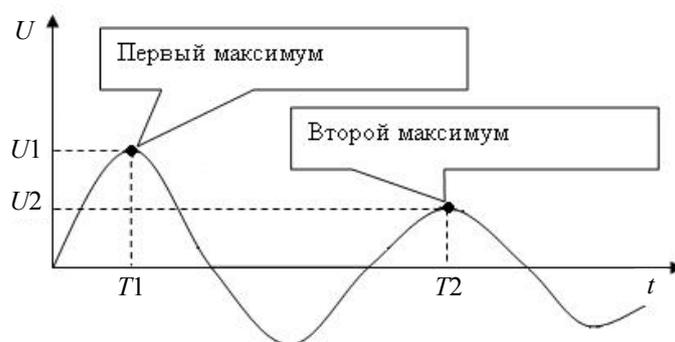


Рис. 6. Измерение координат первого и второго максимума переходного процесса

2. Параллельно исследуемому элементу включить в схему дополнительную емкость (порядка сотен пФ или десятков нФ) с целью достижения незначительного изменения частоты колебательности переходного процесса (рис. 7). Произвести измерения координат максимумов согласно п. 1. Данные о значении номинала дополнительной емкости и координатах максимумов занести в программу.

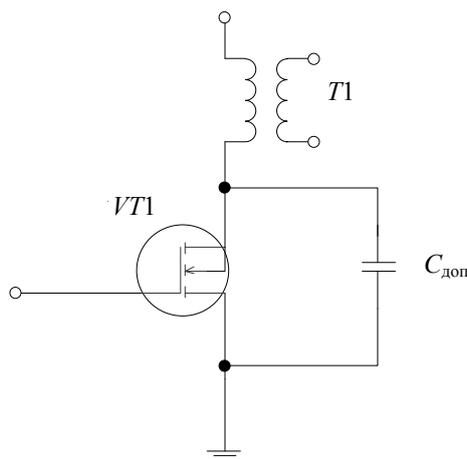


Рис. 7. Внесение в схему дополнительной емкости

3. После занесения всех необходимых данных в программу нужно перейти на закладку «Расчет параметров схемы замещения». После нажатия на кнопку «Расчет» программа рассчитает все необходимые параметры переходных процессов и схемы замещения ключевого элемента (рис. 9).

4. В закладке «Графики переходных процессов» программа строит исходный переходный процесс и переходной процесс после введения дополнительной емкости (рис. 10).

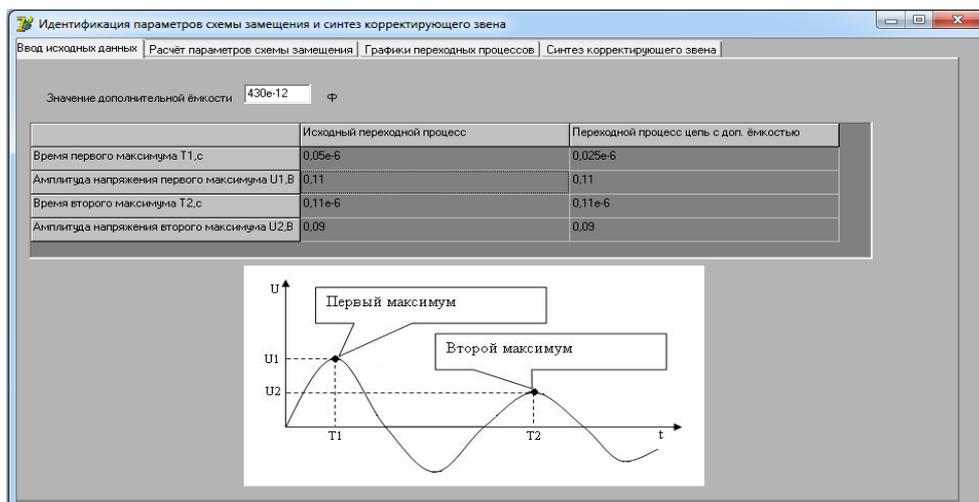


Рис. 8. Занесение данных в программу

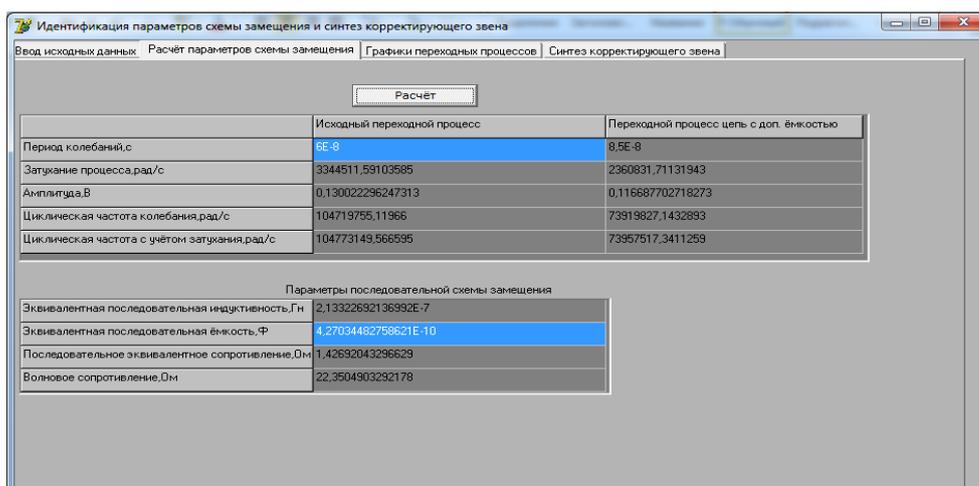


Рис. 9. Расчет параметров схемы замещения

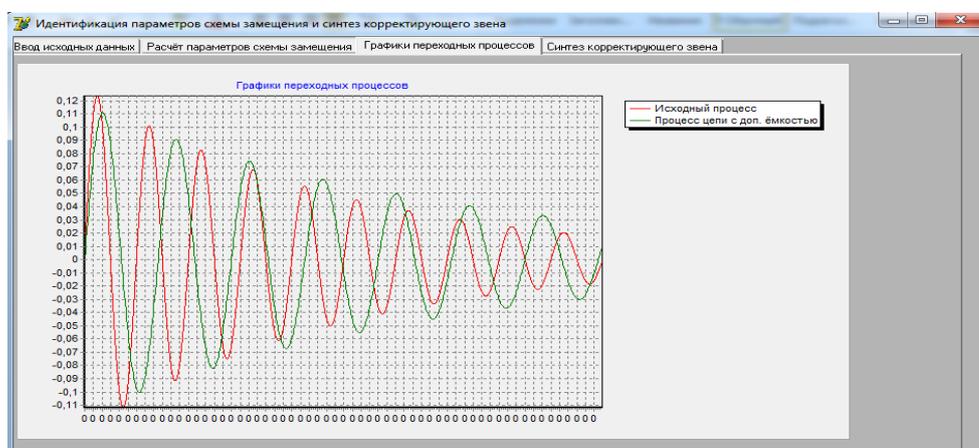


Рис. 10. Графики переходных процессов

