



УДК 621.3(0758)

© 2007

Член-корреспондент НАН України А. Е. Божко

О подтверждении новой концепции о переходных процессах в электроцепях экспериментальными исследованиями

The theoretical and experimental substantiation of expansions of input spasmodic voltages for electric circuits into two components is given. The first component is the sum of damping harmonics, and the second one is the exponentially increasing voltage.

В работах [1–3] представлена новая концепция о переходных процессах в электрических цепях постоянного и переменного тока. В основе этой концепции лежит принцип разложения на составляющие скачкообразных напряжений, подключаемых на вход электроцепей, и эффект автоматической реструктуризации электроцепей с реактивными элементами при входных полигармонических сигналах [4]. Поводом к формированию составляющих разложения скачкообразных напряжений послужило несоответствие графиков переходных процессов в электроцепях, рассчитанных с помощью известных методов (классического, операционного), осциллограммам реальных переходных процессов, исследованных в эксперименте. Так, реально, при включении RL цепи, где R и L — резистор и индуктивность соответственно, на постоянное напряжение $U_{\text{вх}} = U_0 1(t)$, где $1(t)$ — единичная функция {1 при $t \geq 0$ и 0 при $t < 0$ }; t — время, осциллограмма переходного процесса тока i_L такая, как показано на рис. 1, а. При включении той же электроцепи на заряженный до напряжения U_{C0} конденсатор емкостью C осциллограмма переходного процесса тока i_C изображена на рис. 1, б.

Как видно на этих осциллограммах, вблизи $t = 0$ имеется участок, медленно возрастающий с двумя-тремя уменьшающимися по экспоненте волнистыми линиями, после которого идет более крутое нарастание по экспоненте тока до максимального значения.

В эксперименте, соответствующем рис. 1, а, максимальный ток — это установившийся при $t = \infty$, а в эксперименте, соответствующем рис. 1, б, ток после достижения своего максимального значения уменьшается по экспоненте до нуля.

При решении задач о переходных процессах в подобных электроцепях и при таких же режимах включения этих цепей на напряжения $U_{\text{вх}} = U_0 1(t)$ или начальное напряжение

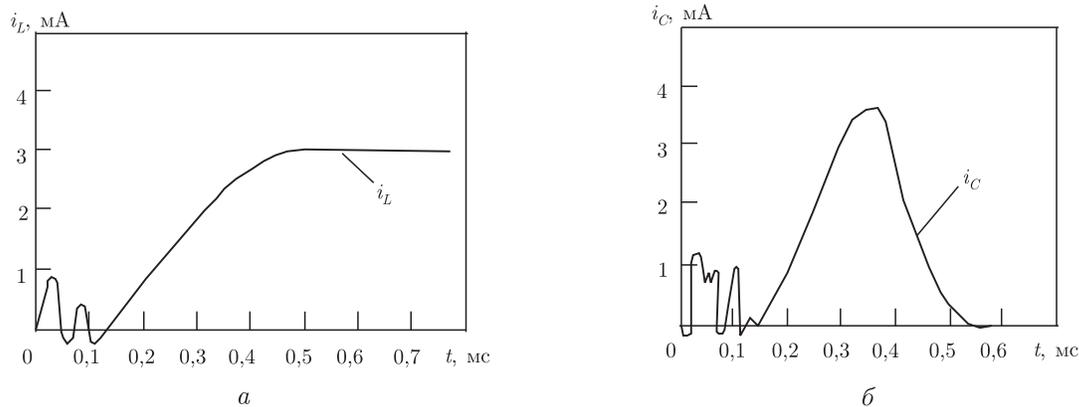


Рис. 1

U_{C_0} заряженной емкости C методами существующей теории [5] указанных начальных медленно возрастающих с некоторыми изображениями затухающих колебаний в графиках переходных процессов токов не имеется. И в связи с этим возникает научный интерес поиска причин такого несоответствия между реальностью и существующей теорией. Во-первых, почему в начальном участке тока имеются волны? Во-вторых, почему, в принципе, имеется этот начальный участок? Теоретический анализ дал следующий ответ. Должно быть, при включении электроцепи на скачкообразное напряжение $U_{01}(t)$ последнее распадается на некоторые составляющие, среди которых имеются низкочастотные затухающие гармоники $U_{ak}e^{-\alpha t} \cos \omega_k t$, $k = \overline{1, n}$, где U_{ak} — амплитуда; ω_k — круговая частота; α — коэффициент затухания. Причем α должен быть значительно больше коэффициента затухания δ самой электроцепи (для RL цепи $\delta_L = R/L$; для RC цепи $\delta_C = 1/(RC)$). Время затухания этих гармоник $\Delta t \approx 4,6 \cdot 1/\alpha$. После Δt переходный процесс тока в RL цепи идет в соответствии с существующей теорией (см. рис. 1, а, б). А это значит, что после Δt переходный процесс можно рассчитывать таким образом, что ко входу цепи подключается постоянное напряжение U_0 . При таком логическом анализе теоретически $U_{01}(t)$ при включении на вход электроцепи (любой — RL , RC , RLC и т. д.) должно распадаться на составляющие следующего вида (дана общая формула разложения $U_{01}(t)$)

$$U_{\text{вх}} = U_{01}(t) = U_0(1 - e^{-\alpha t}) + e^{-\alpha t} \sum_{k=1}^n U_{ak} \cos \omega_k t, \quad (1)$$

где $\sum_{k=1}^n U_{ak} = U_0$.

Проверим правильность этого представления таким образом. При $t = 0$ $U_{\text{вх}} = U_0$; при $t = \infty$ $U_{\text{вх}} = U_0$. То есть проверка подтверждает правильность данного разложения. Для подтверждения реальности представленного разложения (1) был проведен экспериментальный анализ скачкообразных напряжений $U_{\text{вх}} = U_{01}(t)$ и $U_{\text{вх}} = U_{C_0}e^{-\delta t}$ на анализаторах спектров фирмы “Брюль и Кьер”. Эти напряжения подключались скачкообразно ко входу анализатора спектров. Ключами в схемах анализа были как механические переключатели, так и полупроводниковые (триггеры). Результаты анализа были идентичны. Осциллограммы на экране анализатора имели вид, показанный на рис. 2.

Одновременно в эксперименте на анализаторах спектра проведен анализ переменных напряжений $U_a \sin(\omega t \pm \varphi)$, где φ — угол сдвига. При $\varphi = 0$ никаких гармоник, кроме $\sin \omega t$,

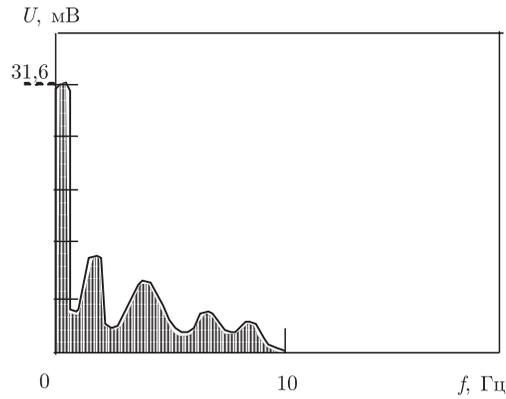


Рис. 2

на экране анализатора не было. При $|\varphi| > 0$ осциллограммы на экране анализатора имеет вид, изображенный на рис. 3.

В этом случае напряжение при $t = 0$ равно $\pm U_a \sin \varphi$, т.е. является скачкообразным $[\pm U_a 1(t)] \sin \varphi$ и поэтому несет в себе затухающий спектр низкочастотных гармоник. Учитывая разложение (1), напряжение $U_a \sin(\omega t \pm \varphi)$ на основе экспериментальных исследований можно представить в виде

$$U(t) = U_a \sin(\omega t \pm \varphi) = U_a(1 - e^{-\alpha t}) \sin(\omega t \pm \varphi) \pm e^{-\alpha t} \sin \varphi \sum_{k=1}^n U_{ak} \cos \omega_k t, \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^n U_{ak} = U_a,$$

где α — коэффициент затухания такой же, как и в (1).

Проверим наш вывод. Для этого определим, что при $t = 0 \sin \varphi \sum_{k=1}^n U_{ak} = U_a \sin \varphi$ и при $t = \infty U = U_a \sin(\omega t \pm \varphi)$, т.е. получается полное соответствие физике входного напряжения. Такое динамическое состояние входного напряжения связано с тем, что составляющая $U_a(1 - e^{-\alpha t}) \sin(\omega t \pm \varphi)$ экспоненциально нарастает от нуля при $t = 0$ до $U_a \sin(\omega t \pm \varphi)$ при $t = \infty$, а составляющая $e^{-\alpha t} \sin \varphi \sum_{k=1}^n U_{ak} \cos \omega_k t$ изменяется от $U_a \sin \varphi$ при $t = 0$ до нуля при $t = \infty$. Изменения этих составляющих происходит по экспоненте с коэффициентом затухания α . Переходный процесс в электроцепи, на которую подается переменное напряжение со скачком, обусловлен представленными составляющими входного переменного напряжения со скачком при $t = 0$ и происходит более медленно, чем переходный процесс самого входного напряжения.

Таким образом, экспериментальный анализ скачкообразных напряжений показал присутствие в этих напряжениях ряда затухающих гармоник. Наличие этих гармоник предопределяет ответ на второй вопрос о наличии начального участка Δt . Этот участок присутствует в электроцепях с реактивными элементами L или C , сопротивления которых определяются выражениями $x_{kL} = \omega_k L$ или $x_{kC} = 1/(\omega_k C)$ соответственно. Как видно из этих выражений, сопротивления x_{kL} и x_{kC} зависят от круговых частот ω_k k -х гармоник. Если же на схему с реактивными элементами подается одновременно полигармоническое на-

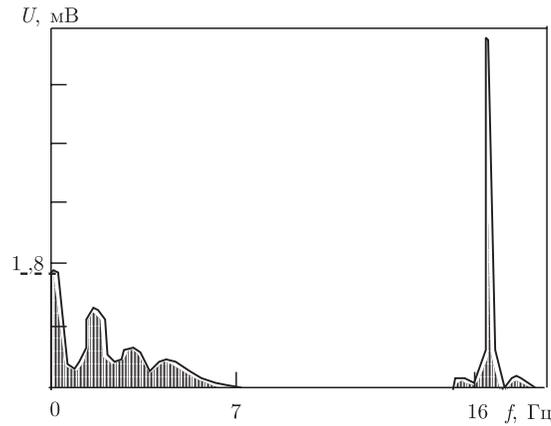


Рис. 3

пряжение $U_{\text{вх}} = \sum_{k=1}^n U_{ak} \cos \omega_k t$, то в схеме возникает автоматическая реструктуризация [4], в соответствии с которой увеличивается сопротивление цепи для всех гармоник входного напряжения. Если же $U_{\text{вх}} = e^{-\alpha t} \sin \varphi \sum_{k=1}^n U_{ak} \cos \omega_k t$ является затухающим полигармоническим, то общее сопротивление цепи с затуханием входных гармоник синхронно уменьшается и ток в соответствии с законом Ома [5] увеличивается. Так происходит и в наших случаях. В начале переходного процесса в связи с наличием во входном скачкообразном напряжении составляющих $e^{-\alpha t} \sum_{k=1}^n U_{ak} \cos \omega_k t$ или $e^{-\alpha t} \sin \varphi \sum_{k=1}^n U_{ak} \cos \omega_k t$, которые практически затухают до нуля за время $\Delta t = 4,6 \cdot (1/\alpha) RL$, схема оказывает большее затухающее сопротивление, чем после Δt . В RC схеме в период Δt общее сопротивление меньше, чем после Δt , и поэтому в начале переходного процесса напряжения U_C на емкости C это напряжение возрастает медленно (перезаряжаясь затухающими гармониками $e^{-\alpha t} U_{ak} \cos \omega_k t$, $k = \overline{1, n}$, а после Δt заряжается быстрее от напряжения U_0 или перезаряжается быстрее от $U_a \sin(\omega t \pm \varphi)$. Наличие участка Δt в переходном процессе тока в RL цепи или напряжения на емкости C в RC цепи предопределяет некоторую зону нечувствительности электроцепи к входному сигналу.

В принципе физически естественно, что любой динамический объект, каким являются и RL , RC и другие электросхемы, имеет зону нечувствительности как по длительности, так и по величине входного воздействия. Если, например, на RL электроцепь подавать на вход импульсы, длительностью меньше Δt , то в этой цепи ток не достигнет нужного значения. Заметим, что импульсы раскладываются на гармонические ряды [5, 6]. Нами в эксперименте были исследованы спектры прямоугольных импульсов. При определенных длительностях их спектры соответствуют классическим [5, 6], но если увеличить длительность, то на экранах анализаторов спектров появляются затухающие гармоники, соответствующие переднему и заднему фронтам импульсов. О возможности разложения единичной функции и δ -функции в ряды Фурье (гармонические ряды) известно [5–7]. Однако в нашей концепции разложение комбинированное, имеющее экспоненциально нарастающую составляющую $U_0(1 - e^{-\alpha t})$ или $U_a(1 - e^{-\alpha t}) \sin(\omega t) \pm \varphi$ и затухающий ряд гармоник нижних частот $e^{-\alpha t} \sum_{k=1}^n U_{ak} \cos \omega_k t$ или $e^{-\alpha t} \sin(\pm \varphi) \sum_{k=1}^n U_{ak} \cos \omega_k t$. В работе [6] на рис. 8.48 (с. 550) показан

переходный процесс в фильтре. График этого процесса полностью соответствует графику, обусловленному новой концепцией о переходных процессах в электроцепях, являясь дополнительным подтверждением этой концепции.

Эксперименты, упомянутые выше, проводились в отделе надежности и динамической прочности Института проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины автором совместно со старшим научным сотрудником к. т. н. Е. А. Личкатым и ведущим инженером И. С. Тертышным.

1. *Божко А. Е.* К концепции о переходных процессах в электрических цепях // Доп. НАН Украины. – 2003. – № 12. – С. 72–75.
2. *Божко А. Е.* Новая интерпретация переходных процессов в электрических цепях // Там же. – 2004. – № 9. – С. 83–87.
3. *Божко А. Е.* О новой трактовке переходных процессов в электрических цепях переменного тока // Там же. – 2005. – № 4. – С. 81–86.
4. *Божко А. Е.* Об автоматической реструктуризации электрических цепей с реактивными элементами при полигармонических входных сигналах // Там же. – 2002. – № 11. – С. 101–103.
5. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. – Москва: Высш. шк., 1978. – 528 с.
6. *Андре Анго.* Математика для электро- и радиоинженеров. – Москва: Наука, 1965. – 780 с.
7. *Тихонов А. Н., Самарский А. А.* Уравнения математической физики. – Москва: Наука, 1972. – 736 с.

*Институт проблем машиностроения
им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков*

Поступило в редакцию 18.11.2005