

## Некоторые аспекты обратимости процессов в линейных электрических цепях второго порядка

В.В. Пивнев, С.Н. Басан

В настоящее время, как в научной, так и в учебной литературе можно встретить различное толкование свойства обратимости. Так, например, в теории линейных электрических цепей свойство обратимости формулируется в виде теоремы обратимости (взаимности) [1].

Другое толкование свойства обратимости заключается в том, что процесс  $x(t)$  считается обратимым, если, начиная с некоторого момента времени  $t_1$ , процессы в исследуемой системе проходят в обратной последовательности [2] (рис. 1). В данной работе используется второе понимание свойства обратимости процессов.

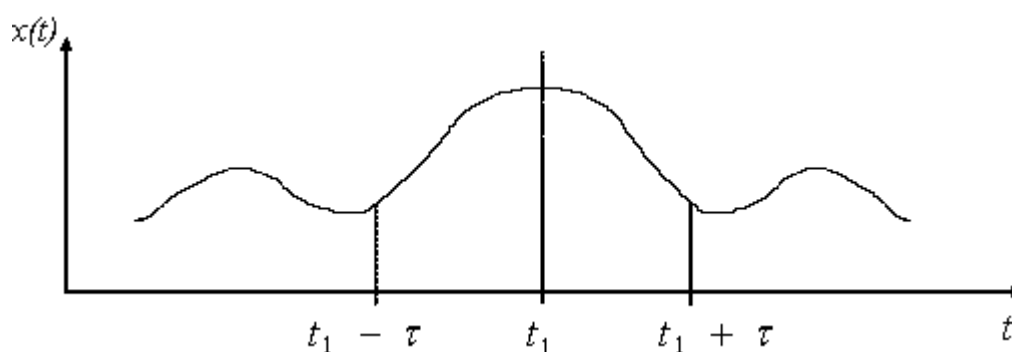


Рис. 1. – Свойство обратимости процесса  $x(t)$

**Определение.** Процесс изменения силы тока  $i_k$  (или напряжения  $u_k$ ) в одной из ветвей электрической цепи будем называть обратимым в том случае, когда, начиная с некоторого момента времени  $t_1$ , в результате изменения параметров схемы замещения электрической цепи (коммутации), выполняется условие:

$$i_k(t_1 + \tau) = i_k(t_1 - \tau). \quad (1)$$

Или

$$u_k(t_1 + \tau) = u_k(t_1 - \tau).$$

В основе многих форм движения материи лежат электромагнитные взаимодействия. Поэтому условия протекания обратимого процесса, полученные при изучении обратимости в электрических цепях, могут быть распространены и на другие формы движения материи, механическую, тепловую и т.п. Эти результаты в перспективе могут быть применены при решении проблем в различных областях практической деятельности (энергетика, экология, медицина, гидромеханика и т.п.) [3, 4, 5, 6, 7]. Так, например, создав условия обратимости в электронной модели при исследовании аварийных ситуаций в электрических цепях, можно выявить последовательность нарушения режимов работы отдельных устройств. В этой связи тема данной работы представляется актуальной.

Целью данного исследования является определение изменений в линейной электрической цепи второго порядка (коммутаций), при выполнении которых ток будет изменяться, начиная с некоторого момента времени  $t_1$  в обратной последовательности. Рассмотрим схему замещения произвольной линейной электрической цепи второго порядка (рис. 2).

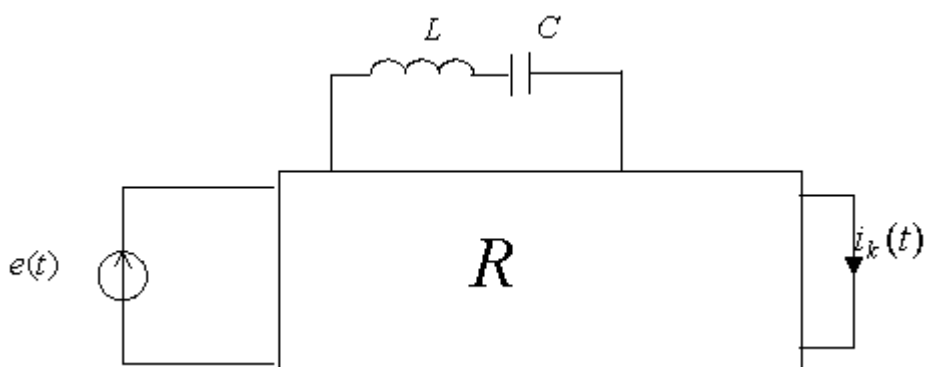


Рис. 2. – Схема замещения произвольной линейной электрической цепи второго порядка

Здесь  $e(t)$ - источник напряжения;  $R$  – линейный резистивный пассивный многополюсник;  $L$  – индуктивность;  $C$ - ёмкость;  $i_k(t)$  - ток в  $k$ - й ветви.

Пусть требуется в этой электрической цепи произвести в заданный момент времени  $t_1$  коммутацию таким образом, что бы ток (или напряжение) в

ветви  $v$  стал изменяться в обратной последовательности. В общем случае для заданного класса электрических цепей ток  $i_v$  изменяется по закону:

$$i_v(t) = i_{vnp}(t) + \sum_{k=1}^{k=n} A_k e^{p_k t}, \quad (2)$$

где  $i_{vnp}(t)$  - принуждённая составляющая тока;  $A_k$  - постоянные интегрирования;  $p_k$  - корни характеристического уравнения;  $n$  - порядок электрической цепи.

Применяя к (2) условие (1) для схемы после коммутации, получим:

$$i_v(t_1 + \tau) = i_{vnp}(t_1 - \tau) + \sum_{k=1}^{k=n} A_k e^{p_k (t_1 - \tau)}. \quad (3)$$

Путём несложных преобразований уравнение (3) можно привести к виду:

$$i_v(t_1 + \tau) = i_{vnp}(t_1 - \tau) + \sum_{k=1}^{k=n} B_k e^{p'_k \tau}.$$

где  $B_k = A_k e^{p_k t_1}$ ;  $p'_k = -p_k$ .

Требуемого закона изменения принуждённой составляющей можно добиться, изменив соответствующим образом параметры независимых источников электрической энергии в цепи. Обратимость процесса для свободной составляющей можно обеспечить, изменив знаки соответствующих элементов таким образом, что бы знаки корней характеристического уравнения изменились на противоположные.

В качестве примера рассмотрим условия обратимости для свободной составляющей тока  $i_{kcc}$  в схеме замещения линейной электрической цепи второго порядка (рис. 2).

Известно [8], что для схемы замещения на рис. 2 свободная составляющая тока  $i_{kcc}$  для моментов времени  $t < t_1$  может быть представлена в виде:

$$i_{kcc} = A e^{-\frac{R}{2L}t} 2 \sin \left( \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \cdot t + \psi_1 \right). \quad (4)$$

Если для моментов времени  $t > t_1$  к уравнению (4) применить условие (1), то получим:

$$i_{kcc}(t_1 + \tau) = Be^{\frac{R}{2L}\tau} 2 \sin \left( \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \cdot (t_1 - \tau) + \psi_1 \right). \quad (5)$$

В выражениях (4) и (5)  $R$  - эквивалентное входное сопротивление резистивного многополюсника со стороны  $LC$  – контура. Таким образом, для того, чтобы вещественная часть корня поменяла знак на противоположный, достаточно поменять знак входного сопротивления. Можно показать, что для этого достаточно поменять знаки активных сопротивлений, входящих в состав резистивного многополюсника. Данная коммутация может быть реализована, если все резисторы в составе многополюсника синтезировать на основе аналого-цифро-аналоговых элементов [9, 10].

Работа выполнена при поддержке гранта №213.01-24/2013-96 «Разработка и исследование распределенной системы интеллектуального управления процессом производства, передачи и распределения энергии»;

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-1098.2013.10;

Работа выполнена при поддержке гранта НШ-1557.2012.10.

### **Литература:**

1. Сешу С., Балабанян Н. Анализ линейных цепей [Текст]: Монография / С. Сешу, Н. Балабанян. – Москва: Изд-во «Госэнергоиздат», 1963. – 551с.
2. Савельев И.В. Курс физики. Том 1. Механика. Молекулярная физика [Текст]: Монография/И.В. Савельев. – Москва: Изд-во «Наука», 1989. – 350 с.
3. Фиговский, О. Нанотехнологии: сегодня и завтра (зарубежный опыт, обзор) [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2011, №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2011/511> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
4. Дробашева Т.И., Расторопов С.Б. Термостойкость кислородных щелочных вольфрамовых и молибденовых бронз [Электронный ресурс] // «Ин-

женерный вестник Дона», 2013, №1. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1488> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

5. Набережных А.И., Деменев А.В. Теория и практика создания энергоэффективной бытовой холодильной техники, работающей при экстремально высокой температуре окружающей среды [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013, №2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1620> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

6. Karamov F.A. Investigations of Reversible and Polarised Interfacial Surface Properties by Electrochemical Impedance Method // Materials Science Forum. Trans Tech Publications, Switzerland, 1998. – Vols. 289 – 292. – P.871-878. – Режим доступа: // <http://www.scientific.net/MSF.289-292.871> (доступ: 28\$) – Загл. с экрана. – Яз. англ.

7. Daniel R. Cornejo, F.P. Missell. Study of Reversible and Irreversible Magnetization Processes Using the Moving Preisach Model // Materials Science Forum. Trans Tech Publications, Switzerland, 1999. – Vols. 302 – 303. – P.53-58. – Режим доступа: // <http://www.scientific.net/MSF.302-303.53> (доступ: 28\$) – Загл. с экрана. – Яз. англ.

8. Нейман Л. Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том1 [Текст]: Монография / Л. Р. Нейман, К.С. Демирчян. – Ленинград: Изд-во «Энергоиздат», 1981. – 530 с.

9. Басан С.Н., Изотов М.В. Применение микропроцессорных устройств в задачах синтеза нелинейных электрических цепей с заданными свойствами [Текст] // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Перспективные исследования науки и техники – 2011». Технические науки, Промышленность, наука и образование, 2011. – № 56. – С.17-24.

10. Басан С.Н., Изотов М.В. К проблеме выбора аналого-цифрового элементного базиса при реализации нелинейных резистивных двухполюсни-

ков с заданными вольтамперными характеристиками [Текст] // Известия вузов. Электромеханика. 2010. – №6. – С.80-83.