

Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

ЗАДАЧИ ПО ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ В КУРСЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ ДЛЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО СИГНАЛИЗАЦИИ, ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ И БЛОКИРОВКЕ

Рассматриваются отдельные задачи по переходным процессам, которые возникают при анализе работы электромагнитных реле. Эти задачи имеют теоретический интерес. Также их содержание связано с актуальными практическими вопросами для систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Проанализированы особенности расчета переходных процессов в схемах «земля Максвелла» и «схема Гульстада». Методом кусочно-линейной аппроксимации решена задача о переходных процессах в катушке реле при движении якоря. Показано, что включение этих задач в курс теоретических основ электротехники служит целям практико-ориентированного обучения.

Введение. Несмотря на широкое внедрение микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры, электромагнитные реле первого класса надежности продолжают использоваться в системах железнодорожной автоматики и телемеханики [1, 2]. Современные релейно-процессорные электрические централизации не уступают по функциональности микропроцессорным [3]. Даже если электромагнитные реле не найдут применения в перспективных системах интервального регулирования движения поездов [4], то миниатюрные реле-герконы сохраняют свое место в аппаратуре управления электроснабжением железной дороги [5, 6].

Переключение электромагнитных реле, обладающих существенной индуктивностью, сопровождается переходными процессами [7]. Поэтому соответствующий раздел теории электрических цепей имеет важное практическое значение для специалистов в области железнодорожной автоматики и телемеханики. Кроме того, теория переходных процессов находит широкое применение при решении задач электромагнитной совместимости [8]. Проблематика электромагнитной совместимости крайне актуальна в современных условиях из-за увеличившейся чувствительности микроэлектронной элементной базы и ухудшившейся электромагнитной обстановки [9]. Из этого следует, во-первых, необходимость основательного изучения переходных процессов студентами соответствующей специальности транспортных вузов. Во-вторых, необходима адаптация содержания учебного материала к потребностям специальности.

В статье рассматриваются отдельные задачи по переходным процессам, которые представляют интерес для анализа работы электромагнитных реле и могут использоваться в учебном процессе, так как имеют не только узкопрактический (работа реле), но и теоретический и методический интерес. Такие задачи рассмотрены в [7]. Указанный источник является библиографической редкостью и требует дополнений в некоторых аспектах.

Основная часть.

Для анализа работы реле представляет интерес схема, называемая «земля Максвелла» (рисунок 1). Расчет переходных процессов в ней представлен в [7, 10].

Он выполнен классическим методом расчета переходных процессов.

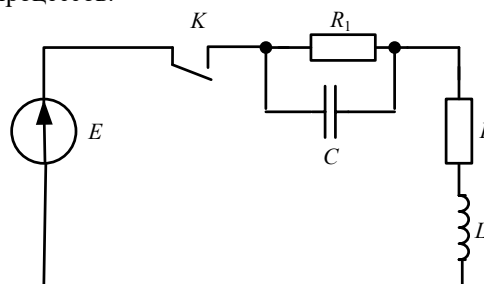


Рисунок 1 – Схема «земля Максвелла»

Но для подготовки специалистов СЦБ целесообразно провести анализ влияния емкости конденсатора C на переходные процессы в апериодическом режиме. Для этого выражение для тока в катушке преобразуется к виду [7]

$$i(t) = I \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + i_m, \quad (1)$$

$$i_m = I \left[e^{-\frac{t}{\tau}} + e^{-bt} \left(\frac{R_1 + R - Lb}{\sqrt{b^2 - \omega_0^2}} \operatorname{sh} \sqrt{b^2 - \omega_0^2} t - \operatorname{ch} \sqrt{b^2 - \omega_0^2} t \right) \right],$$

$$I = \frac{E}{R + R_1}, \quad \tau = \frac{L}{R + R_1}, \quad b = \frac{L + CRR_1}{2LCR_1},$$

$$\omega_0^2 = \frac{R + R_1}{LCR_1},$$

где t – время, с; E – ЭДС источника питания, В; L – индуктивность катушки реле, Гн; C – емкость конденсатора в цепи, Ф; R – сопротивление обмотки реле, Ом; R_1 – сопротивление в схеме, Ом.

В случае апериодического переходного процесса при $\frac{b}{CR_1} > \omega_0^2$ емкость конденсатора замедляет работу

реле, а при $\frac{b}{CR_1} < \omega_0^2$ ускоряет работу реле.

Чем меньше параметр $L \frac{\sqrt{b^2 - \omega_0^2}}{R_1 + R - Lb}$, тем раньше

скажется влияние емкости конденсатора на скорость протекания переходного процесса [7].

Для анализа релейных схем представляет интерес схема Гульстада (рисунок 2) при работе ключа на замыкание [7].

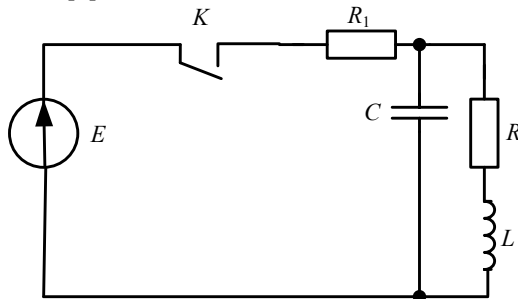


Рисунок 2 – Схема Гульстада

Расчет переходных процессов в ней выполнен в [7, 10] классическим методом расчета переходных процессов, в частности, получено выражение для переходного тока в обмотке реле для аperiodического процесса. Примечательными являются следующие обстоятельства. Выражение для переходного тока может быть получено в виде замкнутого выражения общей формы. Независимое начальное условие для тока в индуктивности находится по закону коммутации и является нулевым. Зависимое начальное условие для первой производной тока в индуктивности также легко найти путем целесообразного разбиения схемы на контуры и применения законов Кирхгофа. Нахождение начальных условий будет полезным упражнением для студентов. Константы интегрирования вычисляются по известным формулам из [11], учитывая нулевое начальное условие для тока. Эти формулы заметно упрощают расчеты переходных процессов в цепях второго порядка, поэтому усвоение их студентами весьма желательно.

Расчет переходного процесса для тока в индуктивности при работе ключа в схеме Гульстада на размыкание соответствует классической задаче о разряде в последовательном RLC -контуре [12]. Однако в этом случае иначе определяются независимое начальное условие для тока в катушке и зависимое начальное условие для первой производной этого тока [7].

Начальное значение тока в катушке на основании закона коммутации [11, 12] и послекоммутационной схемы на рисунке 2

$$i(0+) = i(0-) = \frac{E}{R + R_1}.$$

Начальное условие для первой производной тока в катушке определяется путем составления уравнения по второму закону Кирхгофа для послекоммутационной схемы с учетом независимого начального условия для напряжения на конденсаторе [11, 12]. Это начальное условие имеет вид [7]

$$u_C(0+) = u_C(0-) = i(0-)R = \frac{ER}{R + R_1}.$$

Тогда зависимое начальное условие имеет вид

$$i'(0+) = -\frac{2ER}{R + R_1} \frac{1}{L}.$$

Поэтому задача может стать полезным упражнением для обучающихся.

Отметим, что в [7] в выражении для зависимого начального условия допущена опечатка.

Также в [7] рассматривается задача о переходном процессе в катушке реле с учетом того, что индуктивность катушки меняется в зависимости от положения якоря. Эта зависимость показана на рисунке 3. На участке от 0 до t_1 якорь в отпущенном положении, на участке от t_1 до t_2 якорь перемещается, и на участке от t_2 до ∞ якорь в притянутом положении.

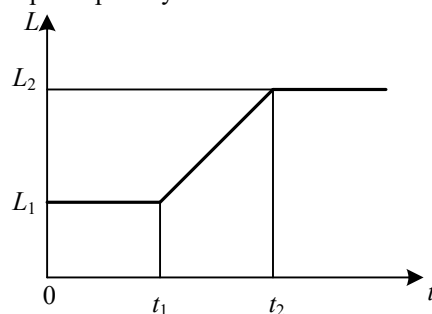


Рисунок 3 – Изменение индуктивности катушки реле при движении якоря

Таким образом, зависимость индуктивности от времени в процессе движения якоря является нелинейной, кусочно-линейной. Поэтому задача расчета переходного процесса, в общем случае, также нелинейная. Решение этой задачи целесообразно осуществить методом кусочно-линейной аппроксимации в форме, указанной в [13]. В [7] решение задачи проводится специальным методом, поэтому оно мало подходит для целей преподавания.

Предполагается, что реле с обмоткой, схема замещения которой представляет собой последовательную RL цепь, подключается к источнику постоянной ЭДС E .

На участке от 0 до t_1 переходный процесс в последовательной RL -цепи описывается уравнением Гельмгольца [7]

$$L_1 \frac{di}{dt} + Ri = E. \quad (2)$$

Решение его по [7]:

$$i(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L_1}t} \right). \quad (3)$$

В момент времени t_1 значение тока в обмотке $i(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L_1}t} \right)$. В этот момент времени якорь

начинает движение. В процессе движения якоря индуктивность катушки меняется по закону $L(t) = a + bt$. Коэффициенты a и b могут быть определены на основании уравнения прямой по двум точкам [14] на гра-

фике зависимости индуктивности от времени (см. рисунок 3) [7]:

$$a = \frac{L_1 t_2 - L_2 t_1}{t_2 - t_1}; \quad b = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1}.$$

Тогда переходный процесс в цепи описывает уравнение

$$L(t) \frac{di}{dt} + Ri = E \quad \text{или} \quad \frac{di}{dt} + \frac{R}{a+bt} i = \frac{E}{a+bt}. \quad (4)$$

Это линейное неоднородное уравнение первого рода. Его решение с учетом начального условия – значения тока в момент времени t_1 – имеет вид [14, 15]

$$i(t) = \left(\frac{1}{a+bt} \right)^{-\frac{R}{a}} \left(i_1 \left(\frac{1}{a+bt} \right)^{-\frac{R}{a}} - \frac{aE(a+bt_1)^{-\frac{R}{a}}}{bR} \right) + a \frac{E(a+bt)^{-\frac{R}{a}}}{bR}. \quad (5)$$

В момент времени t_2 якорь заканчивает движение. При этом значение тока в катушке $i(t_2)$ определяется из (5). Оно является начальным условием для расчета переходного процесса в обмотке реле на следующем этапе. Дальнейший переходный процесс описывается уравнением Гельмгольца

$$L_2 \frac{di}{dt} + Ri = E.$$

Его решение, с учетом начального условия, имеет вид [12, 15]

$$i(t) = \frac{E}{R} + \frac{i_2 - \frac{E}{R}}{e^{-\frac{R}{L_2} t}}. \quad (6)$$

Эта задача полезна тем, что является подготовительной для изучения процессов в нелинейных цепях. Кроме того, на каждом этапе ее решения применяется классический метод расчета переходных процессов в форме, более сложной, чем в предыдущих рассмотренных задачах. Потому эта задача служит также для закрепления знаний по методам расчета переходных процессов и по теории дифференциальных уравнений.

Отметим, что использование этой задачи в курсе теоретических основ электротехники для студентов железнодорожников имеет некоторое преимущество перед рассмотрением задач о периодическом переключении в RL -цепи [12], так как рассматриваемая задача ближе к описанию работы реле в аппаратуре железнодорожной автоматики.

Значительный интерес для расчетов релейной аппаратуры представляют некорректные коммутации в схеме на рисунке 4 [16].

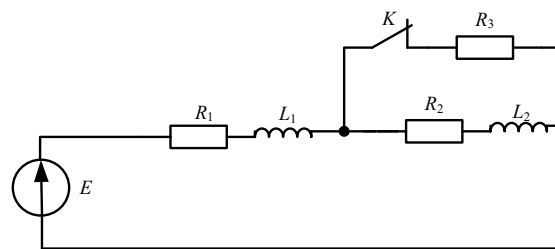


Рисунок 4 – Некорректные коммутации при переключении реле

Поэтому анализ переходных процессов в схеме на рисунке 4 с помощью обобщенного закона коммутации [16] необходимо сохранять в курсе теоретических основ электротехники для специалистов по автоматике и телемеханике.

Заключение.

Проведенное в статье рассмотрение задач о расчете переходных процессов позволяет сделать следующий вывод: имеющиеся в литературе, но не получившие широкого распространения задачи о переходных процессах в обмотках катушек реле сохранили методический интерес и могут найти свое место в курсах теоретических основ электротехники, учитывающих потребности специалистов СЦБ. Таким образом, будет осуществлено практико-ориентированное обучение. Проблема практико-ориентированного обучения в настоящее время является актуальной, т. к. такое обучение значительно повышает подготовленность и востребованность выпускников транспортных вузов.

Список литературы

- 1 Кононов, В. А. Основы проектирования электрической централизации промежуточных станций / В. А. Кононов, А. А. Лыков, А. Б. Никитин. – М. : УМК МПС России, 2002. – 316 с.
- 2 Щиголев, С. А. Микропроцессорная полуавтоматическая блокировка / С. А. Щиголев. – Екатеринбург : НИЦ Промэлектроника, 2016. – 144 с.
- 3 Моисеев, В. В. Перспективы развития МПЦ и РПЦ / В. В. Моисеев // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 7. – С. 7–10.
- 4 Комплексная технология интервального регулирования движения поездов / В. А. Воронин, И. Р. Гургенидзе, М. А. Дежков [и др.]; под ред. С. А. Кобозева. – М. : Издательские технологии, 2022. – 288 с.
- 5 Харазов, К. И. Реле с магнитоуправляемыми контактами / К. И. Харазов. – М. : Энергия, 1971. – 88 с.
- 6 Гуревич, В. И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса / В. И. Гуревич. – М. : Инфор-Инженерия, 2016. – 302 с.
- 7 Коваленков, В. И. Основы теории магнитных цепей и применение ее к анализу релейных схем / В. И. Коваленков. – М. : Изд. АН СССР, 1940. – 158 с.
- 8 Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее применения в технике / Э. Хабигер. – М. : Энергоатомиздат, 1995 – 304 с.
- 9 Кечиев, Л. Н. Электромагнитная несовместимость: опасности, катастрофы, риски / Л. Н. Кечиев. – М. : Грифон, 2022. – 544 с.
- 10 Гинзбург, С. Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях / С. Г. Гинзбург. – М. : Высш. шк., 1967. – 387 с.

11 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1978. – 528 с.

12 Основы теории цепей / Т. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 572 с.

13 Теоретические основы электротехники : в 3 т / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – СПб. : Питер, 2003. – Т. 2. – 377 с.

14 **Воднев, В. Т.** Основные математические формулы / В. Т. Воднев, А. Ф. Наумович, Н. Ф. Наумович. – Минск : Высш. шк., 1988. – 269 с.

15 **Пономарев, К. К.** Составление дифференциальных уравнений / К. К. Пономарев. – Минск : Высш. шк., 1973. – 560 с.

16 **Поливанов, К. М.** Линейные электрические цепи с сосредоточенными постоянными / К. М. Поливанов. – М. : Энергия, 1972. – 240 с.

Получено 05.09.2025

D. V. Komnatny. Problems on transients in course of theoretical electrotechnic for specialists in railway signaling, interlocking and blocking.

Separate problems on transients, which arise during electromagnetic relay operation analyzing, are considered. These problems have a theoretical interest. Also, their matter associated with actual practical questions for railway automatic and telemechanic systems. The peculiarities of transient computations in circuits “Maxwell’s ground” and “Gulstad circuit” are analyzed. The problem of transients in relay coil during armature motion is solved by piecewise linear approximation method. It is shown, that inclusion of these problems in the course of theoretical electrotechnic served the aims of practical-competent education.