

Керимзаде Гюльшен Санан,
Кандидат технических наук, доцент,
Азербайджанский Государственный Университет
Нефти и Промышленности
Kerimzade Gulschen Sanan,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Azerbaijan State University of Oil and Industry

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО УПРАВЛЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Аннотация. В представленной статье рассмотрены характеристики электромеханических устройств по управлению электрических цепей. По назначению электрические цепи классифицируются на силовые электрические цепи (для передачи и распределения электроэнергии); электрические цепи управления (для приведения в действия или изменения параметров работы электротехнических устройств и оборудования); электрические цепи измерения (для фиксации изменения параметров работы электрооборудования). Примером цепи управления является аппаратура контроля, управления, защиты (сигнализации). Являясь приемниками электрического тока, все приборы и устройства включены в электрическую цепь, через них протекает ток и они являются элементами цепи. Протекание тока требует наличия связи между потребителем и приемниками, реализуемая посредством проводов, которые являются третьей составной частью цепи. В электротехнике широко применяются импульсные методы регулирования не только значений токов и напряжения, но и их частоты. Импульсные методы регулирования в силовой электронике и микропроцессорной технике применяются в таких устройствах, мощность которых достигает десятков мегаватт. Поэтому имеет место импульсное регулирование параметров элементов электрических цепей (например, сопротивления резисторов, емкости конденсаторов). Рассмотрена схема высокочастотной коммутации катушек индуктивности, которая позволяет плавно регулировать их эквивалентную индуктивность. Получена непрерывная предельная модель, показана эквивалентность схемы при достаточно высокой частоте коммутации [1-6].

Abstract. The presented article considers the characteristics of electromechanical devices for controlling electric circuits. According to their purpose, electric circuits are classified into power electric circuits (for transmitting and distributing electric power); control electric circuits (for actuating or changing the operating parameters of electrical devices and equipment); measuring electric circuits (for recording changes in the operating parameters of electrical equipment). An example of a control circuit is monitoring, control, and protection (signaling) equipment. Being receivers of electric current, all devices and instruments are included in an electric circuit, current flows through them and they are elements of the circuit. The flow of current requires the presence of a connection between the consumer and receivers, implemented by means of wires, which are the third component of the circuit. In electrical engineering, pulse methods of regulating not only the values of currents and voltage, but also their frequency are widely used. Pulse methods of regulation in power electronics and microprocessor technology are used in such devices, the power of which reaches tens of megawatts. Therefore, pulse regulation of the parameters of the elements of electric circuits (for example, the resistance of resistors, the capacity of capacitors) takes place. A circuit for high-frequency switching of inductance coils is considered, which allows smooth regulation of their



equivalent inductance. A continuous limit model is obtained, and the equivalence of the circuit is shown at a sufficiently high switching frequency [1-6].

Ключевые слова: Электромеханический аппарат, электрическая цепь, управление, характеристика, модель, индуктивность, катушка, эквивалентная схема, импульс, плавное регулирование, система уравнений, сопротивление, период.

Keywords: Control method, electronic equipment, characteristic, control system, scalar method, vector method, output parameters, regulation, load, source, quality.

В электротехнике возможно осуществлять импульсное регулирование индуктивности катушки. Две последовательно соединенные катушки с индуктивностями L_1 и L_2 соответственно, вторая периодически отключается и подключается к устройству, которое обеспечивает поддержание тока i_2 в отключенной индуктивности L_2 , равным току $i_{1в}$ индуктивности L_1 . На рис.1 представлена математическая модель схемы без выравнивания токов в катушках, включенной через резистор с сопротивлением $r=100$ Ом. к источнику постоянного напряжения $U=100$ В. в системе Matlab 6.5 Simulink 5, Sim Power System. Представлена также предельная непрерывная модель схемы исследования. Расчетные параметры определены по формуле:

$$L_{ekv} = \frac{L_1(L_1 + L_2)}{L_2} = \frac{1(1+2)}{2} = 1.5Hn.$$
$$R_{ekv} = \frac{\gamma R(L_1 + L_2)^2}{L_2^2} = \frac{0.5 \times 10^5 (1+2)^2}{2^2} = 1.125 \times 10^5 Om.$$
(1)

В математической модели (рис.1) ключ K_2 , шунтирующий катушку L_2 учтен элементом Ideal Switch, а ключ K_1 – сопротивлением R в разомкнутом состоянии, так как замкнутый ключ K_2 шунтирует R , моделируя замыкание K_1 . Сопротивление замкнутого Ideal Switch и его цепь выбраны так, что в модели можно считать идеальным ключом.

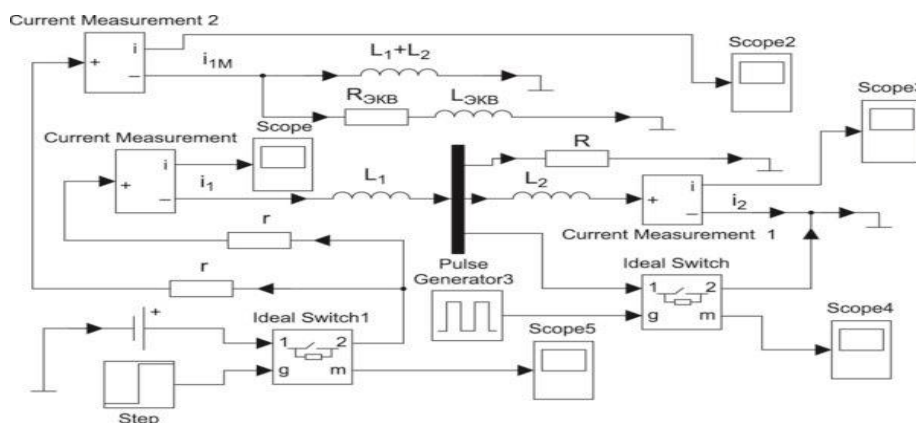


Рис.1 Математическая модель схемы без выравнивания токов в катушках

На рис.2 представлены ток i_1 в реальной катушке L_1 и соответствующий ток предельной непрерывной модели $i_{1м}$. С точностью до пульсаций путем выбора для заниженного значения T , i_1 совпадает с $i_{1м}$, возрастающим практически по экспоненте с постоянной времени, равной $(L_1 + L_2) / \gamma = 3/100$.



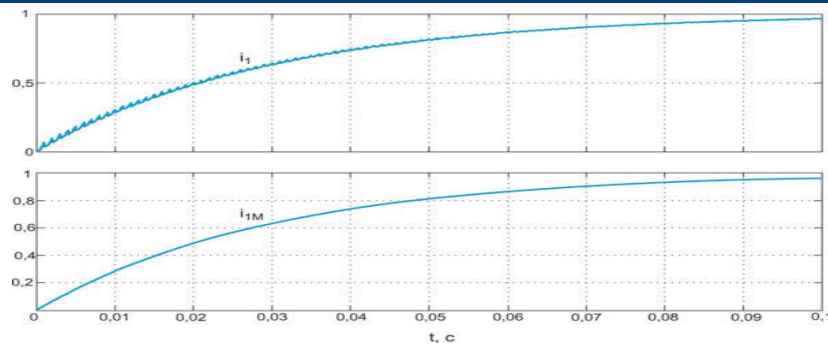


Рис.2 Процессы подключения к источнику постоянного напряжения через резистор с регулируемой индуктивностью при $\gamma=0.5$ – i_1 и ее предельной непрерывной модели – i_{1M}

На рис.3 представлены три первых периода изменения токов i_1 и i_2 и напряжения u_2 на катушке L_2 . Иллюстрируется физическая причина невозможности регулирования индуктивности путем изменения соотношения частей периода коммутации без обеспечения равенства тока i_2 в катушке L_2 , которая отключена во второй части периода, току i_1 во включенной катушке L_1 . В этом варианте схемы выравнивание токов i_1 и i_2 происходит в начале каждого периода коммутации, за счет повышения напряжения на катушке L_2 (u_2) в начале каждого периода. Токи в катушках быстро выравниваются и продолжают возрастать со скоростью, определяемой суммарной индуктивностью (L_1+L_2). Повышая частоту коммутации, можно уменьшить выбросы напряжения и пульсации тока, но процесс нарастания тока i_1 определяет суммарную индуктивность (L_1+L_2).

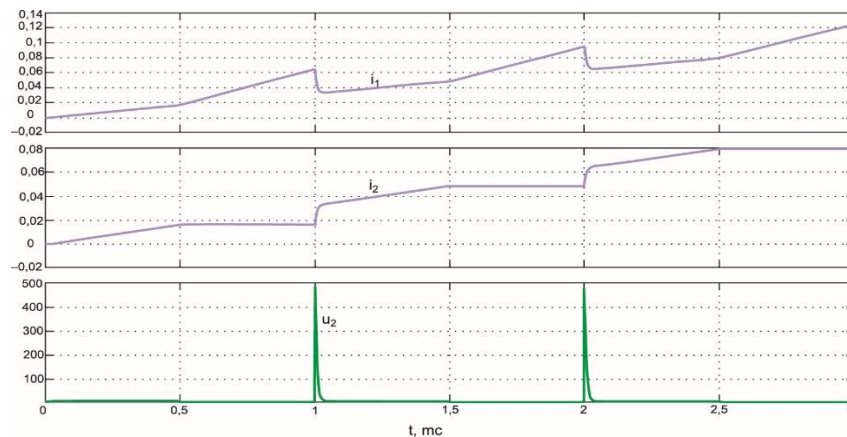


Рис.3 Временные диаграммы токов в первой i_1 и второй i_2 катушках индуктивности; напряжения u_2 на второй катушке

Переходный процесс выравнивания токов i_1 и i_2 в начале второго периода коммутации, описывается при пренебрежении действием относительно малого напряжения u_{ab} системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= -\frac{R}{L_1}i_1 + \frac{R}{L_1}i_2 \\ \frac{di_2}{dt} &= -\frac{R}{L_2}i_1 - \frac{R}{L_2}i_2 \end{aligned} \quad (2)$$



На рис.4 представлен переходный процесс в модели реальной схемы – i_1 и в ее предельной непрерывной модели – i_{1M} при невысокой частоте переключений ($T=0.001s.$); показана разность токов ($i_1 - i_{1M}$), имеющая пульсирующую и плавную составляющие. Повышение частоты коммутации позволяет значительно уменьшить разницу реального тока и тока предельной непрерывной модели.

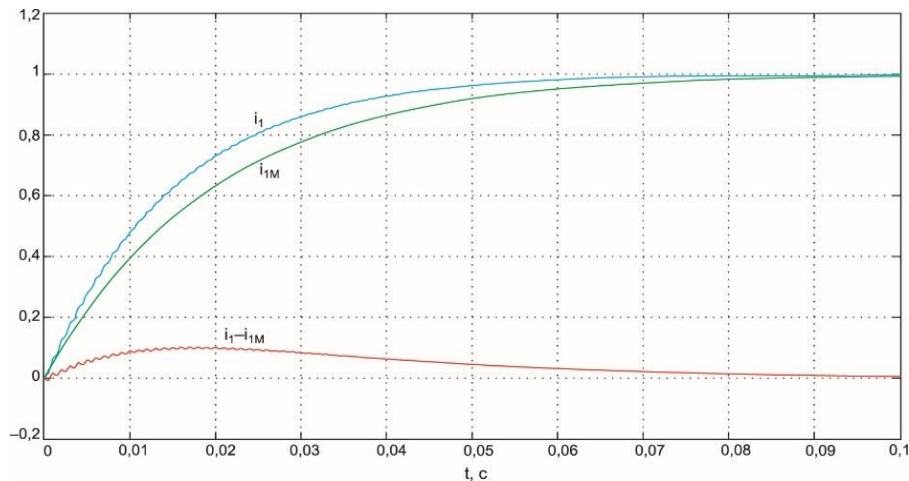


Рис.4 Переходный процесс в модели схемы – i_1 и ее предельной непрерывной модели – i_{1M} при невысокой частоте переключений.

На рис.5 представлены токи i_1, i_2 и их разность при повышенной в 100 раз частоте коммутации ($T=0.00001s.$). Представляется практическое совпадение токов i_1, i_2 ; постоянная времени экспоненты по касательной равна 0.02s., что совпадает с определенной по предельной непрерывной модели.

На рис.6 представлен переходный процесс при включении этой же схемы и ее предельной непрерывной модели на синусоидальное напряжение $u=U_m \sin(\omega t + j)$, $U_m=50V.$, $\omega=2\pi \times 50s^{-1}$, $j=1,2$ через резистор с сопротивлением $r=100 \text{ Ом}$.

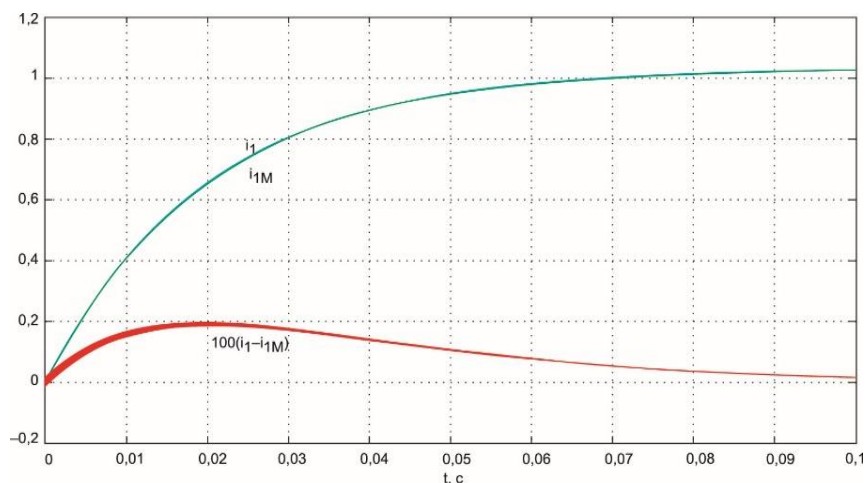


Рис.5 Переходный процесс в модели схемы – i_1 и ее предельной непрерывной модели – i_{1M} при высокой частоте переключений.



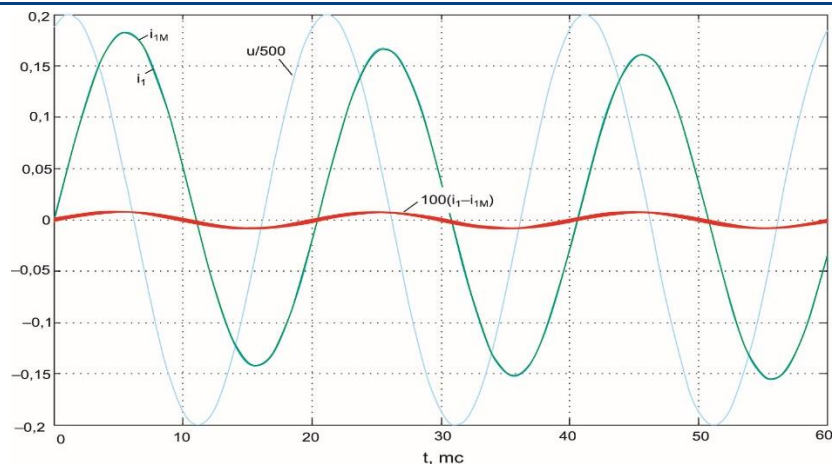


Рис.6 Переходный процесс при включении на синусоидальное напряжение модели схемы – i_1 и ее предельной непрерывной модели – i_{1M} .

Импульсный способ регулирования индуктивности катушки представляет схемное решение. Индуктивность катушки в действительности не изменяется, при уменьшении индуктивности в момент отключения L_2 , ток ветви не изменяется, но при мгновенном уменьшении индуктивности катушки ток в ней $i = \Psi/L$ (Ψ – потокосцепление) возрастает. Изменения относительной продолжительности периодического подключения дополнительной катушки индуктивности последовательно основной при поддержании в отключенной катушке тока, равного току в основной катушке, позволяет плавно регулировать индуктивность. Отличие реальных ключей от идеальных приводит к отличию предельной непрерывной модели от регулируемой индуктивности, пренебрежимо малому при высоком качестве реальных ключей. При достаточно высокой частоте переключений схему импульсного регулирования индуктивности можно с достаточной точностью заменить ее эквивалентной предельной непрерывной моделью.

Список литературы:

1. Керимзаде Г.С., Рзаев М.И. "Характеристики электромеханических аппаратов по управлению электрических цепей". // Известия ВУЗов Азербайджана. Баку. 2025. Том 49 (06). Выпуск 02. 2025. с. 268-280.
2. G.S.Kerimzade, G.V.Mamedova. "Research of electromechanical devices with levitation elements in control systems", Journal "Reliability: Theory & Application". ISSN 1932-2321. Volume 19. № 2 (78). June 2024. pp.85-90.
3. G.S.Kerimzade. "Structure of the monitoring and tracking electromechanical control system", PRZEGŁAD Elektrotechniczny Publishing house of magazines and technical literature SIGMA-NOT. ISSN 0033-2097, R.100. NR 07 / 2024. Warszawa. pp.295-297.
4. G.V.Mamedova, G.S. Kerimzade. "Design parameters for electromechanical devices with a levitation element", PRZEGŁAD Elektrotechniczny Publishing house of magazines and technical literature SIGMA-NOT. ISSN 0033-2097, R.100. NR 09 / 2024. Warszawa. pp.111-113.
5. G.S.Kerimzade, G.V.Mamedova. "Relay contactor system as a means of controlling a linear electric drive", Journal "Reliability: Theory & Application". ISSN 1931-2321. Volume 20. № 1 (82). March, 2025. pp.388-396.
6. Kerimzade G.S. "Features of hanging the parameters of induction control support". // IJTPE Journal, ISSN 2077- 3528 ISSUE. Number 1. March, 2025. pp.69-80.



7.Kerimzade G.S. "Electromechanical devices with levitation elements for control of non-electrical parameters".// Journal "Reliability: Theory & Applications". ISSN 1932-2321. Volume 20, № 2 (84). June 2025.

8.Kerimzade G.S., Mamedova G.V."Application of magnetic levitation technologies to enhance the efficiency of wind energy systems".//International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE). Scientific Technical Center «TATA»,2025. № 01 (430).pp.90-104.

