

УДК 629.78.05.001.2

Ю.В. Степанковский, к.т.н.  
А.В. Клишта

## ИМПУЛЬСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ОРГАНАМИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
e-mail: [akaalka@meta.ua](mailto:akaalka@meta.ua)

*Рассмотрена возможность импульсного управления исполнительным органом магнитной системы ориентации при использовании ключевого усилителя с широтно-импульсной модуляцией. Получены зависимости, позволяющие определить характер изменения тока в режиме непрерывного тока.*

**Ключевые слова:** магнитная система ориентации, коэффициент полезного действия, усилитель, широтно-импульсная модуляция.

### Постановка задачи

Существенным достоинством активных магнитных систем ориентации (МСО) искусственных спутников Земли (ИСЗ) является то, что их масса не зависит от времени функционирования, при этом ко всему бортовому оборудованию предъявляются повышенные требования по массе и энергопотреблению.

Коэффициент полезного действия (КПД) МСО определяется, в первую очередь, КПД усилителя, нагруженного на исполнительный орган, в качестве которого обычно используют электромагниты либо катушки без сердечника [1].

Работа любого устройства, предназначенного для усиления мощности электрических сигналов, основана на регулировании количества энергии, поступающей в нагрузку от источника питания. В аналоговых усилителях мощности осуществляется перераспределение энергии от источника питания между нагрузкой и звеном управления. В качестве активных элементов последних используются транзисторы, работающие, как правило, в режиме класса *B* или *AB*. При линейном управлении в управляющем элементе в интервале времени *T* рассеивается мощность [2]

$$P_{рас} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_Z}{Z} [U_0 - U_Z(t)] dt, \quad (1)$$

где  $U_0$  - напряжение источника питания;  $U_Z$  - напряжение на катушке;  $Z$  - комплексное сопротивление катушки МСО.

Из приведенного выражения следует, что тепловые потери на управляющем элементе обращаются в нуль только тогда, когда напряжение на катушке  $U_Z$  равно  $U_0$  или нулю. Это означает, что максимальный коэффициент полезного действия усилителя может быть достигнут только в том случае, если выходное напряжение представляет собой последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой  $U_0$ . Управляющий элемент при этом работает в ключевом режиме. При использовании аналогового усилителя потери в нем достигают значительных величин, поскольку КПД обычно не превышает 50%.

### Решение поставленной задачи

Использование ключевого режима усилителя связано со специальным преобразованием сигнала управления.

Не касаясь вопросов реализации схемы усилителя, рассмотрим характер изменения токов в катушке без сердечника МСО при использовании ключевого усилителя с широтно-импульсной модуляцией. При этом энергия поступает в катушку дискретными порциями в те интервалы времени, когда транзистор насыщен (ключ *Кл* на рис. 1 замкнут). Мощность, выделяемая в катушке, определяется соотношением времени замкнутого и разомкнутого ключа. Напряжение на нагрузке имеет в этом случае форму прямоугольных импульсов с амплитудой  $U_{п}$ , длительность которых меняется пропорционально величине аналогового сигнала управления, а частота следования импульсов постоянна.

В электрической цепи (рис. 1) ключ  $Kл$  периодически в течение интервалов времени  $nT \leq t \leq (n + \gamma)T$ , где  $n = 0, 1, \dots$ ; подключает катушку к источнику постоянного напряжения  $U_0$  (положение ключа 1), а в течение последующих интервалов  $(n + \gamma)T \leq t \leq (n + 1)T$  (положение ключа 2) ток, вызванный ЭДС самоиндукции, протекает по замкнутому контуру. Здесь обозначено:  $T$  – период коммутации ключа,  $\gamma$  – скважность.

Уравнение цепи в интервалах времени  $nT \leq t \leq (n + \gamma)T$  имеет вид

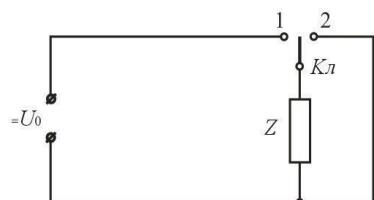


Рис. 1. Эквивалентная схема ключевого усилителя

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U_0,$$

где  $i$  – ток, протекающий по катушке,  $L, R$  – индуктивность и активное сопротивление катушки соответственно.

Уравнение цепи в интервалах времени  $(n + \gamma)T \leq t \leq (n + 1)T$  имеет вид

$$L \frac{di}{dt} + Ri = 0.$$

Поделив последние уравнения на  $R$ , получим

$$T_{ЭМ} \frac{di}{dt} + i = i_0, \quad nT \leq t \leq (n + \gamma)T; \quad (1)$$

$$T_{ЭМ} \frac{di}{dt} + i = 0, \quad (n + \gamma)T \leq t \leq (n + 1)T, \quad (2)$$

где  $T_{ЭМ} = L/R$  – электромагнитная постоянная времени катушки;  $i_0 = U_0/R$ .

Введя новую переменную  $\bar{t} = t/T$  (относительное время) и обозначив через  $\beta = T/T_{ЭМ}$ , уравнения (1) и (2) запишем в виде

$$\frac{1}{\beta} \frac{di}{d\bar{t}} + i = U_{II}; \quad (3)$$

$$\frac{1}{\beta} \frac{di}{d\bar{t}} + Ri = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (3) имеет вид

$$i(\bar{t}) = i_0 + B_1 e^{-\beta(\bar{t}-n)}, \quad n \leq \bar{t} \leq n + \gamma,$$

а уравнения (4) вид

$$i(\bar{t}) = i_0 + B_2 e^{-\beta(\bar{t}-n-\gamma)}, \quad n + \gamma \leq \bar{t} \leq n + 1.$$

Начальные условия запишем в виде:

$$\text{при } \bar{t} = n + \gamma \quad i(\bar{t}) = i(n + \gamma);$$

$$\text{при } \bar{t} = n \quad i(\bar{t}) = i(n).$$

Тогда после определения неизвестных  $B_1$  и  $B_2$  можно записать

$$i(\bar{t}) = i_0 + [i(n) - i_0] e^{-\beta(\bar{t}-n)}, \quad n \leq \bar{t} \leq n + \gamma; \quad (5)$$

$$i(\bar{t}) = \{i_0 + [i(n) - i_0] e^{-\beta\gamma}\} e^{-\beta(\bar{t}-n-\gamma)}; \quad n + \gamma \leq \bar{t} \leq n + 1. \quad (6)$$

Полагая в уравнении (6)  $\bar{t} = n + 1$  и вводя обозначение решетчатой функции  $i[n] = i(n)$ , получим после несложных преобразований неоднородное разностное уравнение первого порядка с постоянными коэффициентами [3]

$$i[n + 1] - e^{-\beta} i[n] = i_0 (1 - e^{-\beta\gamma}) e^{-\beta(1-\gamma)}. \quad (7)$$

Полученное уравнение определяет ток в катушке в дискретные моменты времени  $\bar{t} = n$ . Решив его и подставив  $i[n]$  в выражения (5) и (6), можно определить законы изменения  $i(\bar{t})$  в любой момент времени.

Подвергнув функцию (7) дискретному преобразованию Лапласа при нулевых начальных условиях и переходя к оригиналу, получим [3]

$$i[n] = i_0 \frac{(1 - e^{-\beta\gamma})e^{-\beta(1-\gamma)}(1 - e^{-\beta n})}{1 - e^{-\beta}}$$

Подставив последнее выражение в уравнения (5) и (6) и положив  $\bar{t} = n + \varepsilon$ , где  $n$  - целое число,  $\varepsilon \leq 1$ , получим законы изменения тока в катушке МСО через смещенные решетчатые функции

$$i(n + \varepsilon) = i[n, \varepsilon] = i_0 + [i_0 \frac{e^{-\beta(1-\gamma)} - e^{-\beta}}{1 - e^{-\beta}} (1 - e^{-\beta n}) - i_0] e^{-\beta\varepsilon}, \quad 0 \leq \varepsilon \leq \gamma; \quad (8)$$

$$i(n + \varepsilon) = i[n, \varepsilon] = \{i_0 + [i_0 \frac{e^{-\beta(1-\gamma)} - e^{-\beta}}{1 - e^{-\beta}} (1 - e^{-\beta n}) - i_0] e^{-\beta\gamma}\} e^{-\beta(\varepsilon-\gamma)}, \quad \gamma \leq \varepsilon \leq 1. \quad (9)$$

На основании этих выражений при  $n=0, 1, 2, \dots$  и  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  можно найти ток в катушке в любой момент времени.

С ростом  $n$  ток в катушке стремится к установившемуся периодическому пилообразному току  $i_{ycm}$ , уравнение которого находится из выражений (8) и (9) при  $n \rightarrow \infty$ :

$$i_{ycm} = i[n, \varepsilon] = i[\infty, \varepsilon] = i_0 + [i_0 \frac{e^{-\beta(1-\gamma)} - e^{-\beta}}{1 - e^{-\beta}} - i_0] e^{-\beta\varepsilon}, \quad 0 \leq \varepsilon \leq \gamma; \quad (10)$$

$$i_{ycm} = i[n, \varepsilon] = i[\infty, \varepsilon] = \{i_0 + [i_0 \frac{e^{-\beta(1-\gamma)} - e^{-\beta}}{1 - e^{-\beta}} - i_0] e^{-\beta\gamma}\} e^{-\beta(\varepsilon-\gamma)}, \quad \gamma \leq \varepsilon \leq 1. \quad (11)$$

На рис. 2 для примера представлен график изменения установившегося тока при  $\beta = \gamma = 0,5$ .

Среднее значение установившегося пульсирующего тока в режиме непрерывного тока можно определить из выражений (10) либо (11) как среднеарифметическое максимального и минимального его значений. Например, из выражения (10) получим после приведения подобных членов

$$i_{ycm_{cp}} = \frac{i_{ycm_{min}} + i_{ycm_{max}}}{2} = \frac{i_{ycm} |_{\varepsilon=0} + i_{ycm} |_{\varepsilon=\gamma}}{2} = \frac{i_0}{2} \frac{1 - e^{-\beta} - e^{-\beta\gamma} + e^{-\beta(1-\gamma)}}{1 - e^{-\beta}}. \quad (12)$$

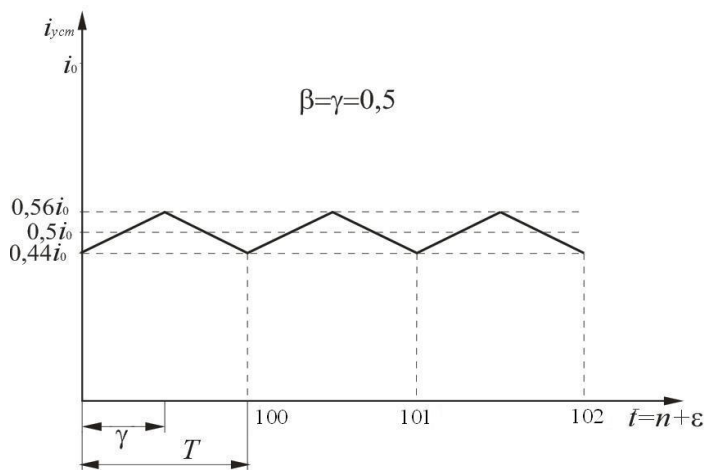


Рис. 2. Пример изменения установившегося тока

Как следует из этого выражения, пропорциональность среднего установившегося тока в режиме непрерывного тока управляющему напряжению тем лучше, чем меньше величина  $\beta = T/T_{ЭМ}$ ; при  $\beta \rightarrow 0$

$i_{ycm_{cp}} = i_0\gamma$ . Поэтому частоту модуляции для обеспечения пропорциональности между сформированным напряжением управления и током в катушке при заданной электромагнитной постоянной времени катушки следует выбирать максимально возможной.

Пульсации тока в установившемся режиме определим из выражения (10)

как разность между его максимальным и минимальным значениями:

$$\Delta i_{ycm} = i_{ycm_{max}} - i_{ycm_{min}} = i_{ycm} |_{\varepsilon=\gamma} + i_{ycm} |_{\varepsilon=0} = i_0 + i_0 \frac{2e^{-\beta} - e^{-\beta\gamma} - e^{-\beta+\beta\gamma}}{1 - e^{-\beta}}. \quad (13)$$

При  $\beta \rightarrow 0$  пульсации тока  $\Delta i_{ycm} |_{\beta \rightarrow 0} \rightarrow 0$ . Следовательно, частоту модуляции для обеспечения минимальных пульсаций при заданной электромагнитной постоянной времени

катушки следует также выбирать максимально возможной.

Для подтверждения полученных теоретических результатов было проведено моделирование системы в пакете Simulink. Схема набора представлена на рис. 3. При моделировании приняты следующие параметры катушки: диаметр намотки - 0,5 м, сечение медного провода – 0,1 мм<sup>2</sup>, количество витков – 1000.

В результате моделирования получены графики, приведенные на рис.4-6.

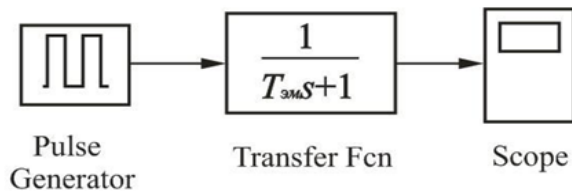


Рис. 3. Схема набора в Simulink

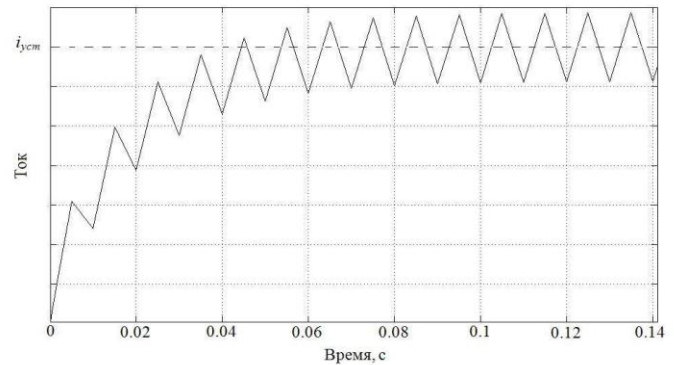


Рис. 4. Изменение тока при  $T_{ЭМ}=0,02$  с,  $\beta=\gamma=0,5$

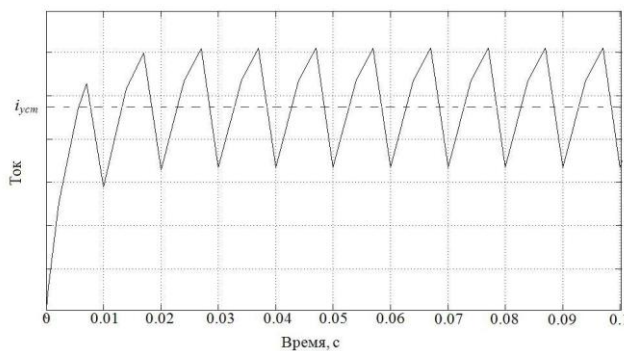


Рис. 5. Изменение тока при  $T_{ЭМ}=5\cdot 10^{-3}$  с,  $\beta=2$ ,  $\gamma=0,7$

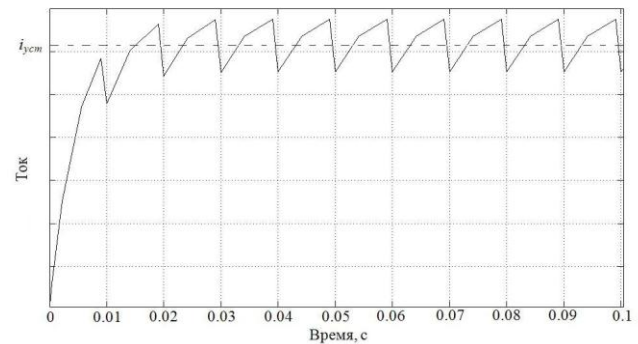


Рис. 6. Изменение тока при  $T_{ЭМ}=5\cdot 10^{-3}$  с,  $\beta=2$ ,  $\gamma=0,9$

Сопоставив графики на рис. 2. и рис. 4. видно, что аналитический расчет при  $\beta=\gamma=0,5$  подтвержден при моделировании системы.

Предметом дальнейших исследований может явиться рассмотрение импульсного управления катушками в виде электромагнита, работа системы в режиме прерывистого тока, а также влияние пульсаций тока при импульсном управлении на динамику спутника.

### Выводы

Показана возможность импульсного управления катушками моментного магнитопривода для режима непрерывного тока с целью повышения коэффициента полезного действия системы ориентации.

### Список литературных источников

1. Коваленко А.П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. М., Машиностроение, 1975, 248 с
2. Азов А.К. Управление бесконтактными двигателями постоянного тока в следящих системах и пути минитюаризации усилителей-коммутаторов. Л., ЦНИИ «Румб», 1982, 84 с
3. Цыпкин Я.З. Теория линейных импульсных систем. М., Физматгиз, 1963, 968 с