

## Импульсное управление электромагнитными приводами

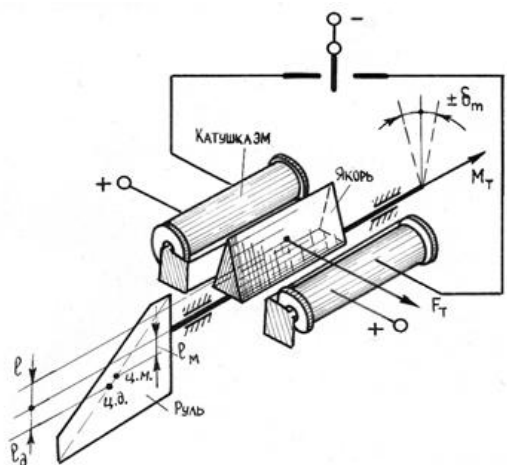
*А. А. Варенов, В.В. Максимов, О.В. Воркунов, О.Е. Куракина,  
А.И. Хаертдинова*

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия*

**Аннотация:** В статье предложен вариант электромагнитного привода управления беспилотником для мониторинга энергообъектов и разработаны расчетные соотношения, определяющие его электромеханические и динамические процессы. Разработана структура и основные характеристики импульсного управления приводом. Проведенные исследования могут быть использованы при выполнении проекта рулевого привода современного беспилотника.

**Ключевые слова:** электромагнитный привод, импульсное управление, разнополярная широтно-импульсная модуляция, структурная схема, магнитная индукция, момент, постоянная, импульсный элемент, ток управления, инерция.

Современный мир характеризуется широким применением беспилотных летательных аппаратов в различных областях, начиная от военной сферы и заканчивая сельским хозяйством. В последние годы они находят широкое применение и в электроэнергетике для мониторинга энергообъектов [1]. Управляясь дистанционно, беспилотники имеют бортовую аппаратуру, в состав которой входят различные типы рулевых приводов, большинство из них для поворота рулевых органов используют электроэнергию [2]. В статье иллюстрируется пример электромагнитного привода рулей (рис. 1).



### Рис. 1. Электромагнитный привод

При отсутствии управляющего сигнала, колебания руля симметричны, а среднее значение управляющего момента равно нулю. При наличии сигнала управления колебания руля становятся несимметричными и образуется средний управляющий момент, пропорциональный току управления  $I_y$ . Приведем расчетные соотношения, определяющие электромеханические и динамические процессы в этом приводе [3]. Тяговое усилие  $F_T$ , развиваемое электромагнитом, определяется выражением [4]:

$$F_T = \frac{B^2 \cdot S}{2 \cdot \mu_0} \quad (1)$$

где  $B$  – магнитная индукция в магнитопроводе;  $S$  – площадь поперечного сечения полюса электромагнита;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная. Момент силы  $M_T$  относительно оси подвеса руля:

$$M_T = F_T \cdot \ell \cdot \cos(\delta), \quad (2)$$

где  $\ell$  – расстояние от оси подвеса руля до линии приложения тягового усилия электромагнита;  $\delta$  – угол поворота руля.

При расчете электромагнита необходимо выполнить условие  $M_T > M_H$ , где  $M_H$  – суммарный момент внешних сил, приложенный по оси подвеса руля, который представляет собой алгебраическую сумму основных возмущающих моментов:

$$M_H = M_{Ш} + M_{Дин} + M_{С.тр.} + M_{В.тр.} + M_{ДБ} \quad (3)$$

где –  $M_{Ш} = K_{П} \cdot \delta$  – шарнирный (позиционный) момент;  $M_{Дин} = J_{ПР} \cdot \ddot{\delta}$  – динамический момент;  $M_{С.тр.} = M_{С.тр.}^0 \cdot \text{sign} \dot{\delta}$  – момент сухого трения;  $M_{В.тр.} = K_{ВТ} \dot{\delta}$  – момент вязкого (скоростного) трения;  $M_{ДБ} = m_p \ell_m \dot{V}_x \sin \delta$  – момент дебаланса руля.

Момент, развиваемый приводом, работающим в автоколебательном режиме, запишем в виде:

$$M_T = M_T^\delta \frac{\Delta t}{t_{\text{ц}}} \quad (4)$$

где  $M_T^\delta$  – градиент развиваемого момента, Нм;  $\Delta t = t_1 - t_2$  – разность времени нахождения руля в одном из крайних положений, с;  $t_{\text{ц}}$  – время цикла (период колебаний), с.

Разность  $\Delta t$  пропорциональна току управления:

$$\Delta t = K_{\text{И}} \cdot I_y \quad (5)$$

где  $K_{\text{И}}$  – коэффициент передачи импульсного элемента, осуществляющего разнополярную широтно-импульсную модуляцию, с/А.

С учетом этого, подставляя (5) в (4), получим:

$$M_T = M_T^\delta \frac{K_{\text{И}}}{t_{\text{ц}}} i_e = K_M i_y \quad (6)$$

где  $K_M = M_T^\delta \frac{K_{\text{И}}}{t_{\text{ц}}}$  – моментный коэффициент, Нм/А.

Динамика привода описывается системой уравнений:

$$U_y(t) = R_y i_y + L_y \frac{di_y(t)}{dt} \quad (7)$$

$$J_{\text{пр}} \frac{d^2 \delta(t)}{dt^2} + K_{\text{в.тр}} \frac{d\delta(t)}{dt} + K_{\text{п}} \delta(t) = M_T(t) \quad (8)$$

$$M_T(t) = K_M \cdot I_y(t) \quad (9)$$

Уравнение (7) описывает баланс напряжений и в нем:  $R_y$  – омическое сопротивление обмотки электромагнита, а  $L_y$  – индуктивность этой обмотки. Уравнение (8) описывает равновесие моментов на оси подвеса руля и в этом уравнении:  $J_{\text{пр}}$  – приведенный момент инерции,  $K_{\text{в.тр}}$  – коэффициент момента вязкого трения,  $K_{\text{п}}$  – коэффициент позиционного момента. Выражение (9) принято называть уравнением управления.

Запишем уравнения (7 – 9) в изображении по Лапласу при нулевых начальных условиях:

$$U_y(s) = R_y \cdot I_y(s) + L_y \cdot S \cdot I_y(s) \quad (10)$$

$$(J_{\text{пр}} \cdot S^2 + K_{\text{в.тр.}} \cdot S + K_{\text{п}}) \cdot \delta(s) = K_M \cdot I_y(s) \quad (11)$$

Исключив из полученной системы ток  $I_y(s)$ , получим передаточную функцию привода:

$$W(s) = \frac{K_{ЭМРП}}{(T_3s+1)(T_M^2s^2+2\xi_M T_M s+1)} \quad (12)$$

где  $K_{ЭМРП} = \frac{K_M}{K_{\Pi} R_y}$  – статический коэффициент передачи электромагнитного рулевого привода;  $T_M = \sqrt{\frac{J_{\Pi\Pi}}{K_{\Pi}}}$  – механическая постоянная времени;  $T_3 = \frac{L_y}{R_y}$  – электрическая постоянная времени;  $\xi_M = K_{\text{вТ}}/2\sqrt{J_{\Pi\Pi}K_{\Pi}}$  – относительный коэффициент затухания.

Как правило  $T_M \leq (5 - 10) \cdot T_3$ , поэтому приближенная передаточная функция привода представляет собой колебательное звено:

$$W(s) = \frac{K_{ЭМРП}}{T_M^2s^2+2\xi_M T_M s+1} \quad (13)$$

Знание передаточной функции привода (13) позволит при необходимости проводить анализ статических и динамических характеристик привода вместе с объектом управления.

На рис. 2 показана принципиальная схема импульсного управления электромагнитами с помощью широтно-импульсного модулятора (далее ШИМ), а временные диаграммы напряжений, прикладываемых к обмоткам электромагнитов, приведены на рис. 3

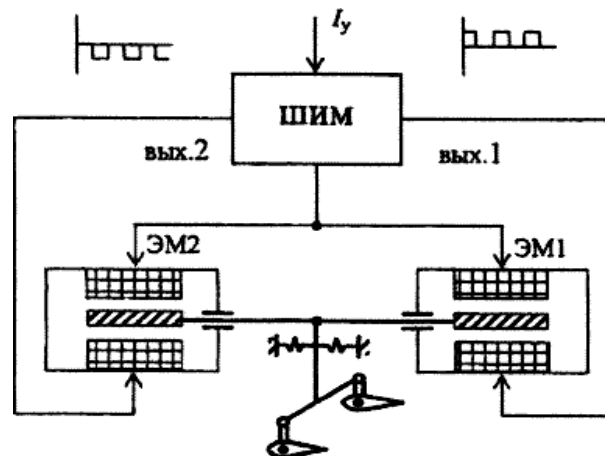


Рис.2. Импульсное управление электромагнитным рулевым приводом:  
принципиальная схема импульсного управления электромагнитами с  
помощью ШИМ;

ШИМ осуществляет преобразование непрерывного тока  $I_Y$  в последовательность прямоугольных импульсов с постоянными амплитудой и периодом следования  $t_{ц} = t_1 + t_2$ . При этом положительные импульсы с длительностью  $t_1$  снимаются с вых.1 ШИМ, а отрицательные импульсы с длительностью  $t_2$  снимаются с вых.2 ШИМ. Из рис.3. видно, что при  $I_Y = 0$  длительности импульсов с вых.1 и вых.2 равны между собой, а  $\Delta t = t_1 - t_2 = 0$ . В данном случае ЭМ<sub>1</sub> и ЭМ<sub>2</sub> обеспечивают симметричные колебания рулей, в результате чего среднее значение управляющего момента за период колебаний, создаваемое ими, равно нулю. Заметим, что направление тягового усилия, создаваемого электромагнитом, не зависит от полярности прикладываемого к обмотке напряжения.

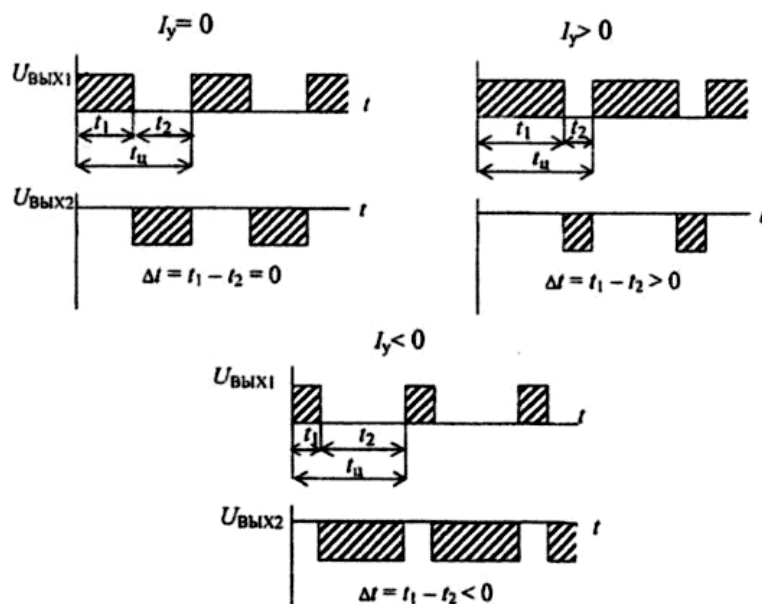


Рис.3. Импульсное управление электромагнитным рулевым приводом:  
временные диаграммы напряжений, прикладываемых к обмоткам  
электромагнитов

При наличии тока управления ШИМ осуществляет разнополярную модуляцию, при которой импульсы на выходе представляют собой последовательность импульсов чередующейся полярности. В зависимости от направления тока управления  $I_U$ , длительность  $t_1$  импульсов одной полярности отличается от длительности  $t_2$  импульсов другой полярности, а в сумме длительности этих импульсов составляют период повторения импульсов (время цикла)  $t_{ц} = t_1 + t_2 = \text{const}$ . При этом электромагниты обеспечивают несимметричные колебания относительно исходного положения и образуется средний управляющий момент, пропорциональный току управления.

Возможен и другой вариант импульсного управления электромагнитным приводом, основой которой является поляризованный электромагнитный преобразователь, работающий в режиме непрерывных переключений с использованием полного хода якоря, схема которого рассматривается в работе [5].

Причины развития импульсного управления процессами состоят в следующем [4]: многие производственные процессы имеют импульсный характер (изменение скорости вращения двигателей, сброс нагрузки, пуск и остановка агрегатов, срабатывание защиты, управление тяговыми электромагнитами и т.д.). Передача информации в виде импульсов, разделённых паузами, позволяет уменьшить мощность, потребляемую от источника питания, при сохранении достаточной мощности импульса [6]. Передача информации в виде последовательности импульсов позволяет разгрузить каналы связи. Передача информации в импульсной форме позволяет значительно повысить помехоустойчивость, точность и надёжность электронных устройств. Дело в том, что при передаче непрерывного сигнала точность снижается из-за дрейфа нуля усилителей, влияния напряжения смещения нуля, входных токов и различных помех.

---

Структурная схема управления, реализующая разнополярную ШИМ, показана на рис.4, а временные диаграммы ее работы – на рис. 5.

Генератор пилообразного напряжения (далее ГПН), тактируемый задающим генератором (ЗГ), вырабатывает опорное напряжение  $u_{оп}$  пилообразной формы с периодом  $T$  [7]. Схема сравнения (далее СС) представляет собой релейный элемент, который переключается с плюса на минус и обратно в момент равенства  $u_{у-} = u_{оп}$  (рис. 5). Для управления ШИМ распределитель импульсов (РИ) имеет два выхода: один  $u_1$  – прямой, второй  $u_2$  – обратный. Эти импульсы, усиленные усилителями (далее У), поступают на базы двух транзисторов ШИМ, переключая их в противофазе.

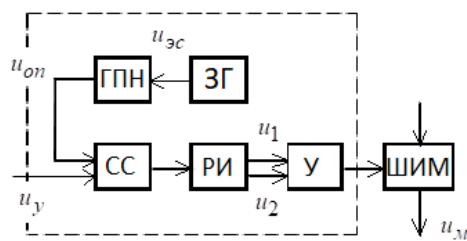


Рис. 4. Структурная схема управления ШИМ

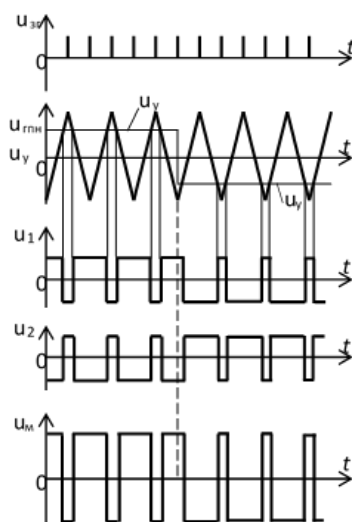


Рис. 5. – Временные диаграммы

Общая структурная схема ШИМ приведена на рис. 6. Она состоит из сумматора, линейного звена с коэффициентом передачи  $K$ , нелинейного

элемента (далее НЭ) и формирователя импульсов (далее Ф). Последовательная цепь преобразования модулирующего воздействия  $u_Y(t)$  в импульсную последовательность  $u_M(t)$  определяется уравнением формирователя, а также уравнением [8]:

$$\varphi(t_n) = 2\pi \cdot n + \varphi_0 \quad (14)$$

Нелинейный элемент обладает характеристикой квантования приращений (рис. 7).

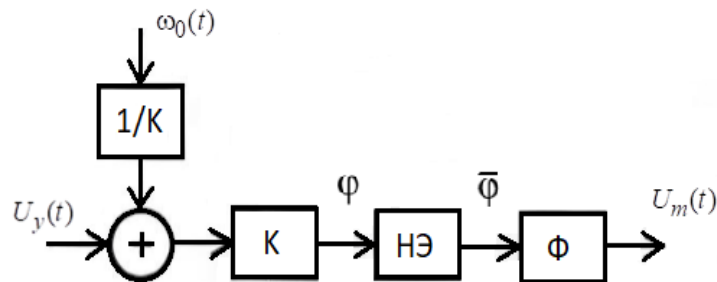


Рис. 6. Общая структурная схема ШИМ

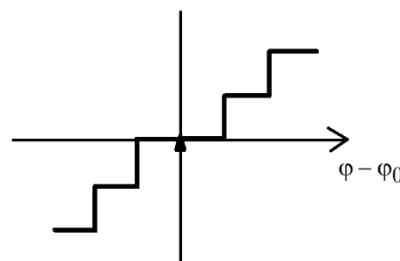


Рис. 7. Характеристика НЭ

По оси абсцисс откладывается разность текущей величины входного сигнала с его значением  $\varphi_0 = \varphi(t_0)$  в момент  $t_0$  начала преобразования. Выходная величина  $\bar{\varphi}$  представляет собой ступенчато изменяющуюся функцию, моменты переключения которой совпадают с моментами определения переменного параметра импульсной последовательности. Структурная схема формирователя ШИМ приведена на рис. 8



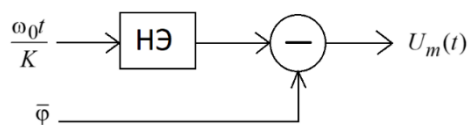


Рис. 8. Структурная схема формирователя

Выходная импульсная последовательность разнополярна [9] и в рассматриваемом случае:

$$S_{gn} \cdot u_M(t) = \{+1 \text{ имп. длит. } t_1\} \cdot t_1 > t_2 \text{ при } u_y > 0 \quad (15)$$

$$S_{gn} \cdot u_M(t) = \{-1 \text{ имп. длит. } t_2\} \cdot t_1 < t_2 \text{ при } u_y < 0 \quad (16)$$

С учетом изложенного структурная схема импульсного привода примет вид, показанный на рис. 9.

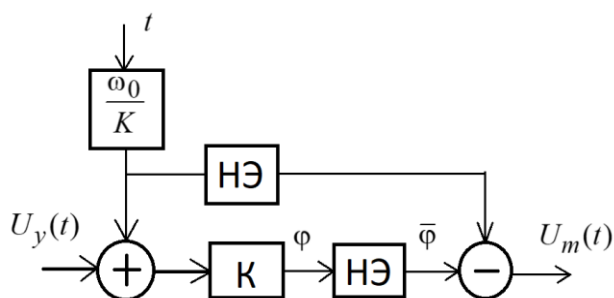


Рис. 9. Структурная схема ШИМ

Изложенная в статье информация является продолжением и расширением представления об электромагнитных приводах, используемых в беспилотниках [10]. Здесь представлена структурная схема управления широтно-импульсным преобразователем, а также схема самого ШИМ. Раскрыты основные достоинства импульсного управления перед непрерывным, основным из которых является то, что передача информации в виде импульсов, разделённых паузами, позволяет уменьшить мощность, потребляемую от источника питания при сохранении достаточной мощности импульса, а это особенно важно для беспилотных летательных аппаратов.

## Литература

1. Воронович С.А., Жмуров Б.В. Тенденции развития электроэнергетических систем беспилотных летательных аппаратов // Интеграл. – 2010. – № 2. – С. 8-11.
  2. Moshkin V. I. Pulsing linear electromagnetic motor mechanical work within the desaturated magnetic system // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Application and Manufacturing (ICIEAM). IEEE Conference Publications, 2017. – pp. 1 – 4.
  3. Горбачев Г. Н., Чаплыгин Е. Е. Промышленная электроника: Учебник для вузов / Под ред. В. А. Лабунцова. М.: – Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
  4. Варенов А.А., Погодицкий О.В., Поташев А.В. Конструкция и эксплуатация специальных изделий: Учебное пособие для вузов.: – МО РФ 2008. – 120 с.
  5. Варенов А. А. Структура и динамическая модель электропривода с импульсным управлением для беспилотного летательного аппарата мониторинга энергообъектов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – № 5-6. – С. 78-83.
  6. Варенов А.А., Поташев А.В., Лосин А.А., Шарипов Т.Р., Зайцев А.В., Малев Н.А. Импульсный привод для беспилотного летательного аппарата мониторинга энергообъектов // Энергетика Татарстана. – 2011. – № 2(22). – С. 60-63.
  7. Курчин М.Д., Юрин А.И., Красивская М.И. Разработка универсальной системы управления рулевыми поверхностями беспилотных летательных аппаратов // Датчики и системы. – 2020. – № 6(248). – С. 15-20.
  8. Кузьмин А.Р., Савельев М.Ф. Актуальные проблемы сенсоров и аппаратного обеспечения коммерческих беспилотных авиационных систем // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2023. – № 2. – С. 121-133.
-

9. Moshkin V.I., Ugarov G.G. The effect of pulse linear electromagnetic motors on voltage fluctuations in electric power networks of an industrial enterprise // Russian Electrical Engineering. – 2015. – vol. 86. – pp. 61-65.

10. Разинцев В. И. О применении автономных электрогидравлических следящих приводов в системах управления БПЛА // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2007. – № 6. – С. 42-48.

### References

1. Voronovich S.A., Zhmurov B.V. Tendencii razvitiya e`lektroe`nergeticheskix sistem bespilotny`x letatel`ny`x apparatov [Trends in the development of electric power systems of unmanned aerial vehicles]. Integral, 2010. № 2, 8-11 p.

2. Moshkin V.I. Pulsing linear electromagnetic motor mechanical work within the desaturated magnetic system. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Application and Manufacturing (ICIEAM). IEEE Conference Publications, 2017, 1-4 p.

3. Gorbachev G. N., Chaply`gin E. E. Promy`shlennaya e`lektronika: Uchebnik dlya vuzov [Industrial electronics: Textbook for universities] Pod red. V. A. Labunczova. M.: E`nergoatomizdat, 1988, 320 p.

4. Varenov A.A., Pogodiczkij O.V., Potashev A.V. Konstrukciya i e`kspluataciya special`ny`x izdelij: Uchebnoe posobie dlya vuzov [Design and operation of special products: Textbook for universities]. MO RF 2008, 120 p.

5. Varenov A. A. Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Problemy` e`nergetiki, 2013, № 5-6, pp.78-83.

6. Varenov A.A., Potashev A.V., Losin A.A., Sharipov T.R., Zajcev A.V., Malev N.A. E`nergetika Tatarstana, 2011, № 2(22), pp.60-63.



7. Kurchin M.D., Yurin A.I., Krasivskaya M.I. Datchiki i sistemy`, 2020, № 6(248), pp.15-20.
8. Kuz`min A.R., Savel`ev M.F. Vestnik Rossijskogo novogo universiteta, Seriya: Slozhny`e sistemy`: modeli, analiz i upravlenie, 2023, № 2, pp.121-133.
9. Moshkin V.I., Ugarov G.G. Russian Electrical Engineering, 2015, vol. 86, pp. 61-65.
10. Razincev V. I. Polet. Obshherossijskij nauchno-texnicheskij zhurnal, 2007, № 6, pp.42-48.

**Дата поступления: 13.02.2024**

**Дата публикации: 31.03.2024**