

ЭЛЕКТРОПРИВОД КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ В РЕЖИМЕ ПРЕРЫВИСТОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

А.В. Аристов

Томский политехнический университет
E-mail: avv@ido.tpu.ru

Предложен способ формирования прерывистого движения вала асинхронного двигателя за счет создания шагового электромагнитного поля при колебательном режиме работы. Представлена функциональная схема и математическая модель электропривода прерывистого движения. Произведена оценка влияния параметров нагрузки на выходные характеристики привода и его точность.

Ключевые слова:

Электропривод колебательного движения, шаговый режим, моделирование, коэффициент максимальной неустойчивости.

Возможность обеспечения режима плавного пуска и остановки асинхронного двигателя (АД) в моменты времени, когда колебательное электромагнитное усилие равняется нулю [1], позволяет использовать электроприводы колебательного движения (ЭКД) в силовых механизмах с регулируемым прерывистым перемещением, например, в приводах подачи кузнечного прессового оборудования или в технологических установках расфасовочно-упаковочного оборудования.

Принцип работы ЭКД в режиме прерывистого движения заключается в создании шагового изменения электромагнитного поля, определяющего закон перемещения подвижного элемента двигателя. Последнее может быть достигнуто за счет импульсного питания одной из обмоток исполнительного двигателя напряжением, когда электромагнитный момент переходит через ноль и прикладывается в одном и том же направлении.

На рис. 1 представлена функциональная схема электропривода колебательного движения, работающего в режиме прерывистого движения.

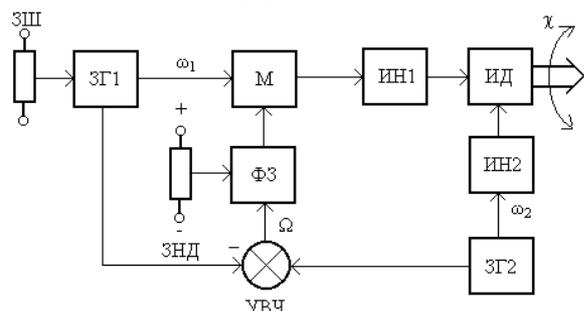


Рис. 1. Функциональная схема электропривода с прерывистым движением вала

Функциональная схема включает в себя: задающие генераторы ЗГ1 и ЗГ2; исполнительный двигатель ИД; инверторы напряжения ИН1 и ИН2, устройство вычитания частот УВЧ; фильтр знака ФЗ; модулятор М; задатчики направления движения ЗНД и шага ЗШ.

На рис. 2 представлены временные диаграммы, поясняющие принцип работы ЭКД для трех различных режимов.

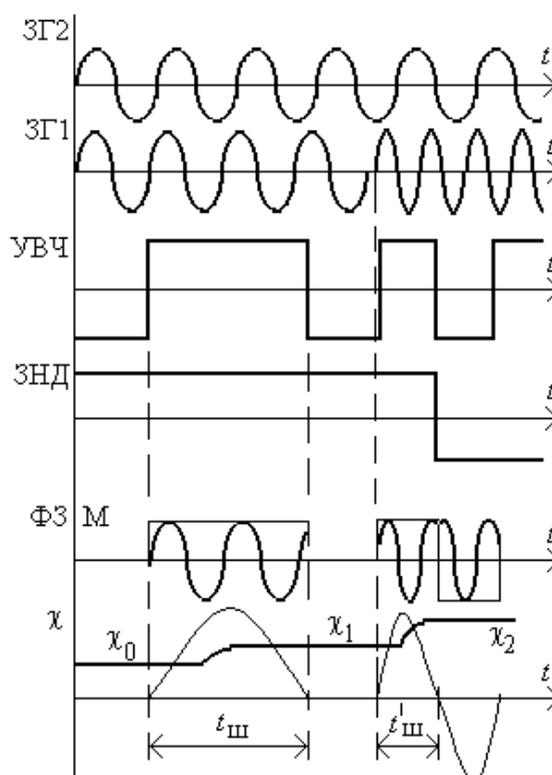


Рис. 2. Временные диаграммы выходных напряжений блоков

Питание одной из обмоток исполнительного двигателя ИД осуществляется через инвертор ИН1 от задающего генератора ЗГ1 напряжением частоты ω_1 через модулятор М. Управление последним производится сигналом разностной частоты ($\omega_1 - \omega_2 = \Omega$) с учетом заданного направления движения, которое определяется полярностью электрического сигнала, поступающего с ЗНД на фильтр знака ФЗ. Фильтр знака преобразует сигнал устройства вычитания частот в модулирующие импульсы положительной либо отрицательной полярности. На вторую обмотку ИД от генератора ЗГ2 через инвертор напряжения ИН2 подается напряжение частоты ω_2 . Благодаря этому реализуется фазовый способ формирования колебательного режима работы [2]. При этом электромагнитный момент в ИД изменяется с угловой частотой Ω , пропорциональной разности частот пи-

тающих токов. Так как ток обмотки исполнительного двигателя получается модулированным по амплитуде периодическим сигналом, соответствующим этой разности частот, то закон движения подвижного элемента описывается выражением

$$\chi(t) = \begin{cases} \chi_n + \chi_m [\sin(\Omega t + \phi) - \sin \phi], & \text{при } nT \leq t \leq nT + t_{\text{ш}}; \\ \chi_{n+1}, & \text{при } nT + t_{\text{ш}} \leq t \leq (n+1)T, \end{cases} \quad (1)$$

где χ_n, χ_{n+1} – начальная и конечная координаты подвижного элемента за один шаг; χ_m – амплитудное значение координаты подвижного элемента двигателя; ϕ – начальная фаза перемещения; $t_{\text{ш}}$ – длительность шага; $n=0,1,2,\dots$ – номер шага.

Как видно из выражения (1), величина шага определяется амплитудным значением χ_m и, в частности, при $t_{\text{ш}} = T/2, |\alpha| = 90^\circ, |\chi_{\text{ш}}| = 2\chi_m$. Регулирование величины шага можно осуществлять при заданных параметрах нагрузки за счет плавного изменения частоты одного из питающих напряжений (например, ЗГ1), либо за счет регулирования одного из фазных напряжений по амплитуде.

С целью оценки влияния параметров нагрузки и функций регулирования на выходные параметры была разработана математическая модель в осях $\alpha, \beta, 0$ электропривода колебательного движения при работе в режиме прерывистого движения в прикладном программном пакете *MathCAD*

$$\begin{pmatrix} t_{j+1} \\ is\alpha_{j+1} \\ is\beta_{j+1} \\ ir\alpha_{j+1} \\ ir\beta_{j+1} \\ \omega_{j+1} \\ \chi_{j+1} \\ M_{j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_j + \Delta t \\ is\alpha_j + \Delta t \begin{bmatrix} \alpha s \cdot U_{m1} \sin(\omega_1 \cdot t_j + \gamma) \cdot A_j - \\ -is\beta_j \cdot \omega_j \cdot Kr \cdot Ks \cdot \frac{1}{\sigma} - is\alpha_j \cdot \alpha s' - \\ -ir\beta_j \cdot \omega_j \cdot Ks \cdot \frac{1}{\sigma} + ir\alpha_j \cdot \alpha r' \cdot Ks \end{bmatrix} \\ is\beta_j + \Delta t \begin{bmatrix} \alpha s \cdot U_{m2} \sin(\omega_2 \cdot t_j + \beta) + \\ +is\alpha_j \cdot \omega_j \cdot Kr \cdot Ks \cdot \frac{1}{\sigma} - is\beta_j \cdot \alpha s' + \\ +ir\alpha_j \cdot \omega_j \cdot Ks \cdot \frac{1}{\sigma} + ir\beta_j \cdot \alpha r' \cdot Ks \end{bmatrix} \\ ir\alpha_j + \Delta t \begin{bmatrix} -\alpha s \cdot Kr \cdot U_{m1} \sin(\omega_1 \cdot t_j + \gamma) \cdot A_j + \\ +is\alpha_j \cdot Kr \cdot \alpha s' + is\beta_j \cdot \omega_j \cdot Kr \cdot \frac{1}{\sigma} + \\ +ir\beta_j \cdot \omega_j \cdot \frac{1}{\sigma} - ir\alpha_j \cdot \alpha r' \end{bmatrix} \\ ir\beta_j + \Delta t \begin{bmatrix} \alpha s \cdot Kr \cdot U_{m2} \sin(\omega_2 \cdot t_j + \beta) - \\ -is\alpha_j \cdot \omega_j \cdot Kr \cdot \frac{1}{\sigma} + is\beta_j \cdot Kr \cdot \alpha s' - \\ -ir\alpha_j \cdot \omega_j \cdot \frac{1}{\sigma} - ir\beta_j \cdot \alpha r' \end{bmatrix} \\ \omega_j + \Delta t \begin{bmatrix} \frac{1}{J} (-Lm \cdot (is\beta_j \cdot ir\alpha_j - is\alpha_j \cdot ir\beta_j)) - \\ -R_{\text{мех}} \cdot \omega_j - C_{\text{мех}} \cdot \chi_j - M_c \end{bmatrix} \\ \chi_j + \Delta t \cdot \omega_j \\ Lm \cdot (is\beta_j \cdot ir\alpha_j - is\alpha_j \cdot ir\beta_j) \end{pmatrix}$$

где $\alpha s, \alpha s', \alpha r, \alpha r', Ks, Kr, \sigma, Lm$ – коэффициенты модели, определяемые параметрами электрической машины согласно [3]; $J, R_{\text{мех}}, C_{\text{мех}}, M_c$ – коэффициенты инерционного, демпфирующего, позиционного усилий нагрузки и момент постоянного сопротивления; Δt – шаг итераций; j – порядковый номер расчетной точки; A_j – импульсная функция, определяемая как

$$A_j = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t_j}{2n-1} \right].$$

При нулевых начальных условиях и $M_c=0$ был проанализирован характер изменения колебательного электромагнитного момента $M(t)$ и подвижного элемента исполнительного двигателя $\chi(t)$, выполненного на базе асинхронной машины типа 4А132М4 номинальной мощностью 11 кВт (рис. 3).

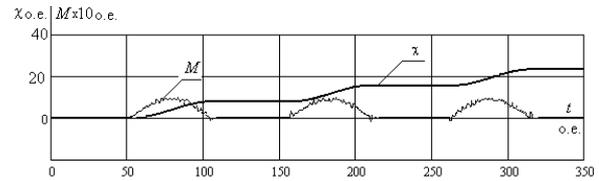


Рис. 3. Зависимости электромагнитного момента $M(t)$ и закона движения подвижного элемента ИД $\chi(t)$ на частоте 5 Гц при $J=8,8$ о.е.; $R_{\text{мех}}=3,95$ о.е.; $C_{\text{мех}}=0$

Результаты исследований показали что, колебательный режим работы при формировании шагового движения не вызывает появления ударных моментов и токов в обмотках исполнительного двигателя. Кроме того, при увеличении составляющих нагрузки не наблюдается пропуска шагов, что характерно для электроприводов, выполненных на базе шаговых двигателей [4]. Так как рассеяние кинетической энергии при колебательном режиме работы ИД происходит в течение шага, то при реверсировании работа двигателя не нарушается. Наличие демпфирующей нагрузки $R_{\text{мех}}$ уменьшает величину χ_m , и позволяет на высоких частотах (в пределах 10...20 Гц) стабилизировать величину шага. При дальнейшем увеличении частоты Ω в шаговой составляющей колебательного электромагнитного момента начинают проявляться высокочастотные пульсации частоты $\omega_1 + \omega_2$, что приводит к ухудшению траектории движения подвижного элемента $\chi(t)$.

Воспользовавшись результатами работы [2] амплитуду подвижного элемента двигателя χ_m при прерывистом движении можно рассчитать аналитическим путем как

$$\chi_m = \frac{M_{\text{пуск}}}{\sqrt{(C_{\text{мех}} - J \cdot \Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - M_{\text{демп}})^2 \Omega^2}}, \quad (2)$$

где пусковая $M_{\text{пуск}}$ и демпфирующая $M_{\text{демп}}$ составляющие электромагнитного момента, нормированные соответственно по своим амплитудным значениям определяются при разложении выражения для электромагнитного момента $M(t)$ в ряд Маклорена по степеням скорости ω в окрестностях скорости $\omega=0$ как

$$M(t) = M_{\text{пуск}}(t)|_{\omega=0} + M_{\text{дем}}(t) \frac{d\chi}{dt} |_{\omega=0}.$$

Из выражения (2) следует, что при наличии позиционной нагрузки $C_{\text{мех}} = \mathcal{K}\Omega^2$ в колебательной системе возникнет электромеханический резонанс, а, следовательно, работа электропривода будет характеризоваться более высокими энергетическими показателями [5]. Однако, для режима прерывистого движения такой подход является неприемлемым. Как показывают результаты исследований, наличие даже небольшой позиционной нагрузки $C_{\text{мех}} \neq 0$ приводит к срыву формирования шагового режима. Подвижный элемент привода начинает совершать однонаправленные колебания относительно положения геометрической нейтрали (рис. 4). Данный режим может быть рекомендован для ряда технологических установок расфасовочно-упаковочного оборудования, где промежуточные звенья преобразования движения недопустимы.

Наиболее критичен режим прерывистого движения к изменениям начальной фазы одного из питающих напряжений (β или γ). Это вызвано несовпадением начальной фазы шаговой составляющей колебательного электромагнитного момента с моментом времени формирования импульсной функции A_j . В результате в кривой движения в течение шага $t_{\text{ш}}$ наблюдаются провалы по амплитуде, а при значении $\beta = \pi/2$ подвижный элемент исполнительного двигателя начинает совершать колебания, аналогичные колебаниям, представленным на рис. 4.

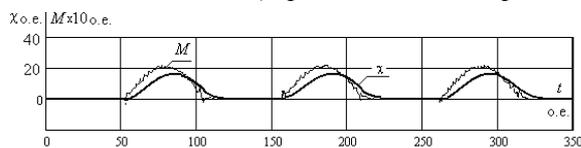


Рис. 4. Зависимости электромагнитного момента и закона движения подвижного элемента ИД на частоте 5 Гц при $J=8,8$ о.е.; $R_{\text{мех}}=3,95$ о.е.; $C_{\text{мех}}=0,088$ о.е.

Оценку точности воспроизведения шага при периодическом движении можно провести по максимальному коэффициенту неустойчивости

$$\delta_m = \delta\phi_0 - \delta\phi_m \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n \cos[n\Omega_1(1-\delta f)t_m + \phi_n(1-\delta\beta_n)] + \sum_{n=1}^{\infty} f_n \cos(n\Omega_1 t_m + \phi_n) + \lambda_n \cos[n\Omega_1(1-\delta f)t_m + \phi_n(1-\delta\beta_n)].$$

Здесь $\delta\phi_0 = (\chi_{n1} - \chi_n)\chi_{m1}^{-1}$; $\delta\phi_m = (\chi_{m1} - \chi_m)\chi_{m1}^{-1}$; $\delta\beta_n = (\beta_n - \beta_n)\beta_n^{-1}$ — относительные по-

грешности по положению нейтрали, амплитуде, частоте и фазе; f_n, λ_n — коэффициенты рядов Фурье, нормированные по величине амплитуды реального $\chi(t)$ и идеального $\chi_1(t)$ законов движения ИД; t_m — момент времени, когда разность $\chi_1(t) - \chi(t)$ становится максимальной, определяемый из решения уравнения

$$\frac{d\chi_1(t)}{dt} - \frac{d\chi(t)}{dt} = (1 - \delta\phi_m)(1 - \delta f) \sum_{n=1}^{\infty} n\lambda_n \sin \left[n\Omega_1(1 - \delta f)t_m + \phi_n(1 - \delta\beta_n) \right] - \sum_{n=1}^{\infty} f_n \sin(n\Omega_1 t_m + \phi_n) = 0.$$

Установлено, что при заданных параметрах нагрузки наибольший вклад в коэффициент максимальной неустойчивости вносит неустойчивость по частоте Ω . Ее влияние на δ_m на порядок выше, чем неустойчивость вызванная изменениями амплитуд питающих напряжений или их фаз. Однако, данный вопрос может быть решен за счет выполнения задающих генераторов по схеме синхронизации с частотой сети или за счет формирования напряжений питания с применением методов фазовой автоподстройки частоты [6].

Функциональная схема электропривода с прерывистым движением вала достаточно просто реализуется на современной элементной базе.

Выводы

1. Предложены функциональная схема электропривода и метод формирования прерывистого движения при фазовом методе возбуждения колебательного режима работы исполнительного двигателя.
2. Разработана математическая модель электропривода прерывистого движения, позволяющая исследовать специальные режимы работы асинхронных двигателей.
3. Доказано, что предложенный метод обеспечивает в заданном частотном диапазоне безударный режим работы во время пуска, реверсирования и регулирования шага.
4. Показано, что оценку точности шагового режима целесообразно производить по максимальному коэффициенту неустойчивости.
5. В целях обеспечения высокой точности шагового движения задающие генераторы необходимо синхронизировать с частотой сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристов А.В. Безударный пуск асинхронного электродвигателя // Известия вузов. Электромеханика. — 1993. — № 5. — С. 52–57.
2. Луковников В.И., Серда В.П. Динамические режимы работы асинхронного электропривода. — М.: Изд-во ВЗПИ, 1990. — 211 с.
3. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. — М.: Энергия, 1973. — 400 с.
4. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / Под общ. ред. М.Г. Чиликина. — М.: Энергия, 1971. — 624 с.

5. Синтез колебательной машины двойного питания по энергетическим характеристикам / Аристов А.В.; Томск. политехн. ин-т. — Томск, 1995. — 19 с.: — Деп. в ВИНТИ 14.02.95, № 414 — В95.
6. А.с. 1453577 СССР. МКИ⁴ Н02Р 7/62. Колебательный электропривод / А.В. Аристов, З.К. Нуриев, С.А. Ткалич. Заявл. 27.04.87; Опубл. 23.01.89, Бюл. № 31. — 3 с.

Поступила 16.11.2008 г.