

УДК 621.313.333

А.В. Аристов, И.А. Эккерт

## Формирование шагового режима работы асинхронного двигателя при потенциальной амплитудно-балансной модуляции

Предложен способ формирования шагового режима работы асинхронного двигателя за счет амплитудной модуляции питающих фазных напряжений с прерыванием напряжения по одной из обмоток. Представлены функциональная схема и математическая модель электропривода. Произведена оценка влияния параметров нагрузки на выходные характеристики привода и его энергетические показатели.

**Ключевые слова:** электропривод шагового движения, асинхронный двигатель, амплитудно-балансная модуляция, обобщенный коэффициент полезного действия.

Работа многих современных систем автоматизации, контроля и управления связана с формированием шагового режима работы асинхронного двигателя (АД). На практике шаговый режим в АД достигается за счет создания одновременного или раздельного периодического изменения пространственного положения магнитного поля статора и оси контура тока ротора, например путем очередного подключения статорных обмоток к источнику постоянного или переменного тока через управляемые вентили или смены направления тока в одной или нескольких обмотках исполнительного двигателя [1].

В последнее время нашли новые методы формирования шагового режима работы АД, основанные на фазовой модуляции питающих напряжений или токов с использованием прерывания питания с частотой шага по одной из его обмоток [2]. Такие электроприводы обладают сравнительно высокой точностью позиционирования и жесткой фиксацией ротора в конце шага, даже если он короткозамкнутый и симметричный.

Однако из-за наличия двух источников питания разной частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$  при запуске исполнительного двигателя на заданную частоту шага  $\Omega$  в первый полупериод движения ротора в кривых электромагнитного момента и скорости наблюдаются высокочастотные пульсации частоты  $\omega_1 + \omega_2$ , что вызывает дополнительные динамические потери в электромеханической системе и как следствие снижение её энергетических показателей.

С целью устранения перечисленных недостатков в данной статье рассматриваются вопросы формирования шагового режима работы двухфазного асинхронного электродвигателя за счет фазовой амплитудно-балансной модуляции питающих напряжений с использованием прерывания напряжения питания по одной из его обмоток.

На рис. 1 представлена функциональная схема электропривода на основе двухфазного асинхронного электродвигателя, реализующая шаговый режим работы за счет амплитудно-балансной модуляции фазных напряжений.

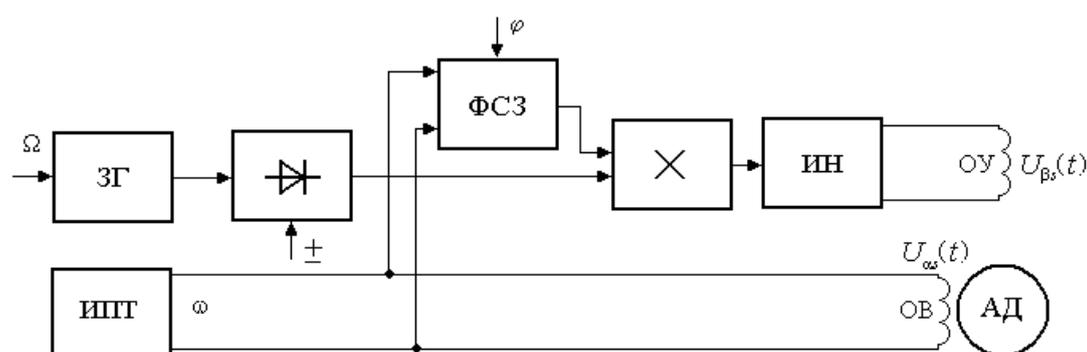


Рис. 1. Функциональная схема электропривода с шаговым движением вала

Она включает в себя: задающий генератор частоты шага (ЗГ); двухфазный асинхронный двигатель (АД) с обмотками управления (ОУ) и возбуждения (ОВ); сетевой источник переменного тока частоты  $\omega$  (ИПТ); инвертор напряжения (ИН); регулируемое фазосдвигающее звено (ФСЗ); модулятор и однополупериодный выпрямитель.

Согласно функциональной схеме, шаговый режим работы в электроприводе достигается за счет питания обмотки возбуждения асинхронного двухфазного двигателя напряжением переменного тока (в качестве которой может выступать сеть):

$$U_{\alpha s}(t) = U_{m1} \cos(\omega t),$$

а обмотки возбуждения – пульсирующим напряжением, получаемым в результате амплитудно-балансной модуляции напряжения сети, сдвинутого относительно напряжения обмотки возбуждения на угол  $\varphi = 90^\circ$  с выпрямленным на вентиле напряжением задающего генератора:

$$U_{\beta s}(t) = U_{m2} \sin(\omega t) \left\{ \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin(\Omega t) - \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\cos 2i(\Omega t)}{(2i-1)(2i+1)} \right\},$$

где  $U_{m1}$ ,  $U_{m2}$  – амплитуды выходных напряжений ИПТ и ИН соответственно.

В результате в воздушном зазоре двухфазного АД формируется электромагнитное поле, результирующий вектор потокосцепления которого изменяется по закону

$$\chi_0(t) = \text{Arctg} \frac{U_{m1} \cos(\omega t)}{U_{m2} \sin(\omega t) \left\{ \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin(\Omega t) - \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\cos 2i(\Omega t)}{(2i-1)(2i+1)} \right\}}, \quad (1)$$

а сам ротор двигателя совершает шаговые движения  $\chi(t)$  с частотой задающего генератора  $\Omega = 2\pi f_{\text{ш}}$ , где  $f_{\text{ш}}$  – частота шага.

Из выражения (1) следует, что электромагнитное поле в воздушном зазоре исполнительного двигателя при амплитудно-балансной модуляции фазных напряжений не содержит гармонических составляющих суммарных частот, как это имеет место при фазовой модуляции. Величина шага (амплитуда  $\chi_m$ ) определяется амплитудными значениями питающих напряжений  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$  с учетом параметров нагрузки, а частота – частотой задающего генератора ЗГ. Направление движения можно изменять за счет изменения полярности выходного напряжения выпрямителя.

С целью оценки влияния параметров нагрузки и функций регулирования на выходные параметры электропривода, а также сравнения фазового и амплитудно-балансного способов возбуждения шагового режима работы АД была разработана математическая модель в осях  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\theta$  в прикладном программном пакете MathCAD.

$$\begin{pmatrix} t_{j+1} \\ i\alpha_{j+1} \\ i\beta_{j+1} \\ i\alpha_{j+1} \\ i\beta_{j+1} \\ \xi_{j+1} \\ \chi_{j+1} \\ M_{j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_j + \Delta t \\ i\alpha_j + \Delta t \left[ as U_{m1} \cos(\omega t_j) - is\beta_j \xi_j Kr Ks \frac{1}{\sigma} - is\alpha_j as' - ir\beta_j \xi_j Ks \frac{1}{\sigma} + ir\alpha_j ar' Ks \right] \\ i\beta_j + \Delta t \left[ as U_{m2} \sin(\omega t_j) \left\{ \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin(\Omega t_j) - \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\cos 2i(\Omega t_j)}{(2i-1)(2i+1)} \right\} + is\alpha_j \xi_j Kr Ks \frac{1}{\sigma} - is\beta_j as' + ir\alpha_j \xi_j Ks \frac{1}{\sigma} + ir\beta_j ar' Ks \right] \\ i\alpha_j + \Delta t \left[ -as Kr U_{m1} \cos(\omega t_j) + is\alpha_j Kr as' + is\beta_j \xi_j Kr \frac{1}{\sigma} + ir\beta_j \xi_j \frac{1}{\sigma} - ir\alpha_j ar' \right] \\ i\beta_j + \Delta t \left[ as Kr U_{m2} \sin(\omega t_j) \left\{ \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin(\Omega t_j) - \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\cos 2i(\Omega t_j)}{(2i-1)(2i+1)} \right\} - is\alpha_j \xi_j Kr \frac{1}{\sigma} + is\beta_j Kr as' - ir\alpha_j \xi_j \frac{1}{\sigma} - ir\beta_j ar' \right] \\ \xi_j + \Delta t \left[ \frac{1}{J} (-Lm(is\beta_j ir\alpha_j - is\alpha_j ir\beta_j)) - R_{\text{мех}} \xi_j - C_{\text{мех}} \chi_j \right] \\ \chi_j + \Delta t \xi_j \\ Lm(is\beta_j ir\alpha_j - is\alpha_j ir\beta_j) \end{pmatrix}$$

где  $is\alpha_j$ ,  $is\beta_j$ ,  $ir\alpha_j$ ,  $ir\beta_j$  – мгновенные значения фазных токов;  $M_j$ ,  $\xi_j$ ,  $\chi_j$  – электромагнитный момент, скорость и координата положения подвижного элемента исполнительного двигателя;  $as$ ,  $as'$ ,  $ar$ ,  $ar'$ ,  $Ks$ ,  $Kr$ ,  $\sigma$ ,  $Lm$  – коэффициенты модели, определяемые параметрами электрической машины согласно

[3];  $J, C_{\text{мех}}, R_{\text{мех}}$  – коэффициенты инерционного, позиционного и демпфирующего усилия нагрузки;  $\Delta t$  – шаг итераций;  $j$  – порядковый номер расчетной точки.

При нулевых начальных условиях и отсутствии позиционной нагрузки ( $C_{\text{мех}} = 0$ ) были проанализированы характеры изменения электромагнитного момента  $M(t)$ , скорости  $\xi(t)$  и координаты движения подвижного элемента исполнительного двигателя  $\chi(t)$ , выполненного на базе асинхронной машины типа АИР71А2, номинальной мощностью 0,75 кВт (рис. 2). Полученные зависимости позволяют сравнить и оценить динамические процессы, протекающие в АД при шаговом режиме работы для случая амплитудно-балансной  $a$  и фазовой  $b$  модуляции, с прерыванием питания по одной из обмоток исполнительного двигателя.

Результаты исследований показали, что при запуске АД в режим шагового движения за счет амплитудно-балансной модуляции фазных напряжений в кривой электромагнитного момента не наблюдаются высокочастотные пульсации частоты сети, а также отсутствуют ударные токи в обмотках исполнительного двигателя.

Последнее объясняется тем, что при запуске свободные составляющие токов, определяющие в первый полупериод частоты  $\Omega$  характер динамического процесса, не содержат, как это имеет место при фазовой модуляции, составляющих с частотой  $\omega + \Omega$  [4].

Кроме того, установлено, что на низких частотах установившееся значение амплитуды шага при амплитудно-балансной модуляции превышает значение амплитуды при фазовой модуляции на 52% (см. рис. 2). Все это позволяет сделать вывод о снижении в случае амплитудно-балансной модуляции динамических потерь и улучшении энергетических свойств асинхронного электропривода.

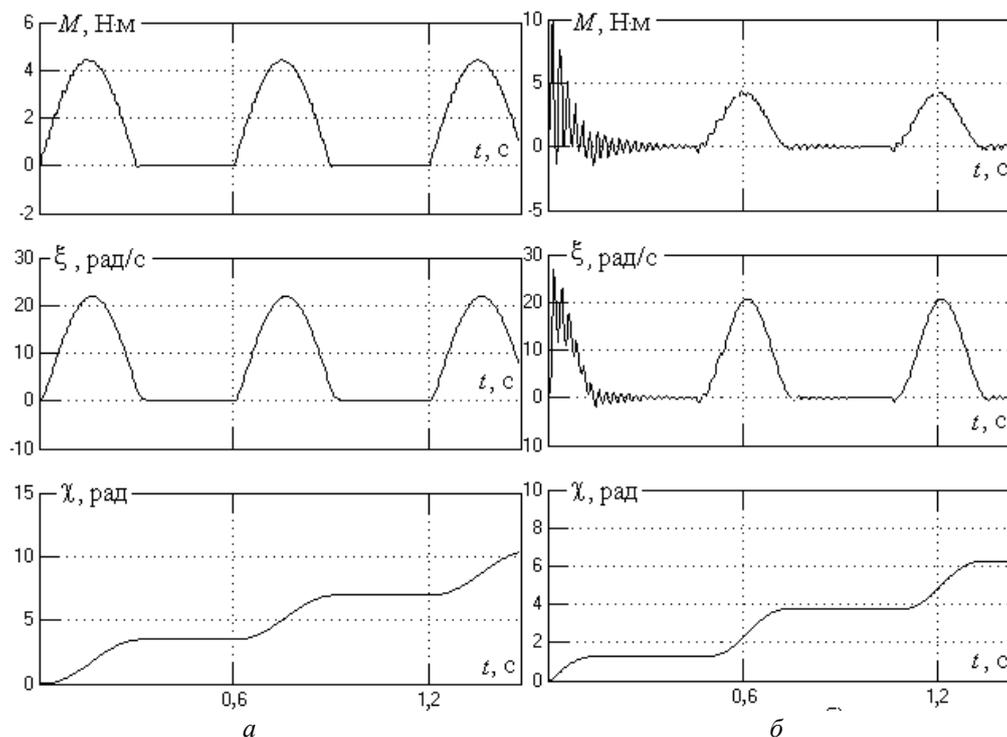


Рис. 2. Зависимости электромагнитного момента  $M(t)$ , скорости  $\xi(t)$  и координаты движения подвижного элемента  $\chi(t)$  исполнительного двигателя при запуске на частоту  $\Omega = 12,56$  рад/с и  $J = 2,6 \cdot 10^{-3}$  кг·м<sup>2</sup>;  $R_{\text{мех}} = 0,2$  Н·м·с/рад:  $a$  – амплитудно-балансная модуляция;  $b$  – фазовая модуляция

Последние можно оценить по обобщенному коэффициенту полезного действия, который выступает как энергетический фактор комплексной оценки эффективности работы электромеханического преобразователя энергии

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{S} = \sqrt{\frac{P_{\text{мех, акт}}^2 + P_{\text{мех, реак}}^2 + P_{\text{мех, иск}}^2}{S}}$$

где  $P_{\text{мех}}, P_{\text{мех, акт}}, P_{\text{мех, реак}}, P_{\text{мех, иск}}$  – полная механическая мощность асинхронного двигателя и ее активная и реактивная составляющие и мощность искажения при шаговом движении;

$S = \sqrt{P_{дв}^2 + Q_{дв}^2 + T_{дв}^2}$  – условно полная потребляемая мощность и ее активная и реактивная составляющие и мощность искажения.

Определение составляющих обобщенного коэффициента полезного действия удобно проводить, используя интегральные методы расчета по выражениям:

$$P_{мех} = \frac{1}{T} \left[ \int_t^{t+T} M(t)^2 dt + \int_t^{t+T} \xi(t)^2 dt \right]^{0,5}, \quad P_{дв} = \frac{1}{T} \left[ \int_t^{t+T} P_{\alpha s}(t)^2 dt + \int_t^{t+T} P_{\beta s}(t)^2 dt \right]^{0,5},$$

$$Q_{дв} = \frac{1}{T} \left[ \int_t^{t+T} Q_{\alpha s}(t)^2 dt + \int_t^{t+T} Q_{\beta s}(t)^2 dt \right]^{0,5}, \quad T_{дв} = \frac{1}{T} \left[ \int_t^{t+T} T_{\alpha s}(t)^2 dt + \int_t^{t+T} T_{\beta s}(t)^2 dt \right]^{0,5}.$$

В качестве примера на рис. 3 представлены расчетные зависимости энергетических характеристик АД при амплитудно-балансной и фазовой модуляции питающих напряжений при варьировании частотой шага  $\Omega$ .

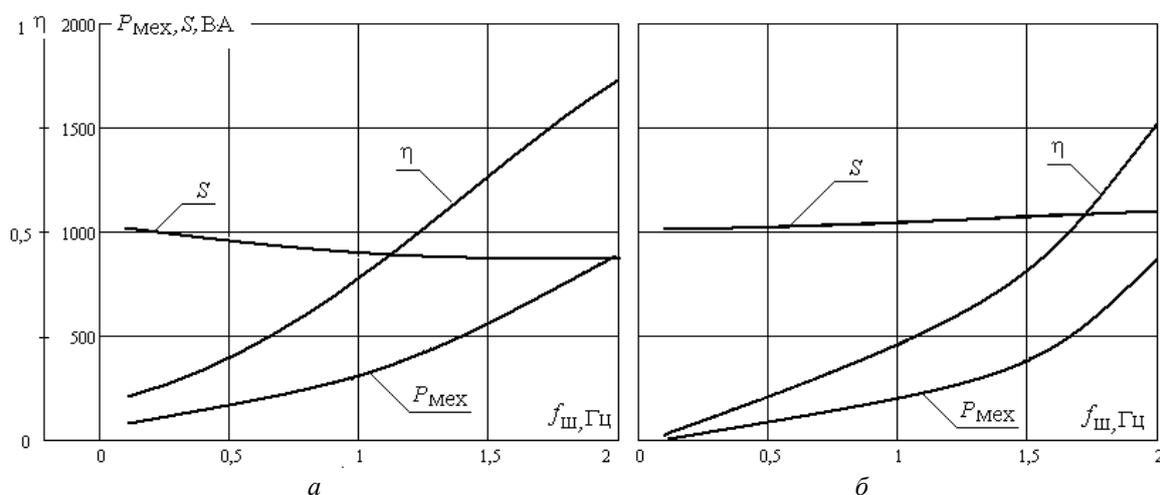


Рис. 3. Зависимости энергетических характеристик АД при шаговом режиме работы от частоты шага  $\Omega$ :  $a$  – амплитудно-балансная модуляция;  $b$  – фазовая модуляция

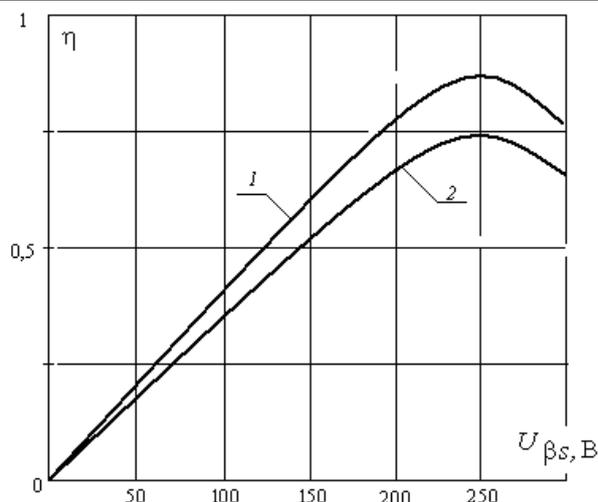
Они также построены при  $C_{мех} = 0$  и  $J = 2,6 \cdot 10^{-3}$  кг·м<sup>2</sup>;  $R_{мех} = 0,2$  Н·м·с/рад. Несмотря на то, что выходные параметры электропривода при амплитудно-балансной модуляции выше, чем при фазовой модуляции и с увеличением частоты шага наблюдается снижение условно потребляемой мощности  $S$  (рис. 3), обобщенный коэффициент полезного действия превышает всего на 13%.

Установлено, что в обоих случаях при увеличении составляющих нагрузки, и в первую очередь инерционной, не наблюдается пропуска шагов, что характерно для электроприводов, выполненных на базе шаговых двигателей [5]. Так как рассеяние кинетической энергии при амплитудно-балансной модуляции фазных напряжений АД происходит в течение одного шага, то при реверсировании работа двигателя не нарушается.

Исследования показали, что наличие демпфирующей нагрузки  $R_{мех}$  уменьшает величину  $\chi_m$  и позволяет на высоких частотах (в пределах 10...20 Гц) стабилизировать величину шага, а внедрение позиционной нагрузки  $C_{мех} \neq 0$ , как и в случае фазовой модуляции, приводит к срыву формирования шагового режима. При этом подвижный элемент привода начинает совершать однонаправленные колебания относительно установившегося положения своей геометрической нейтрали с частотой  $\Omega$ .

Результаты моделирования показали, что варьирование амплитудой напряжения одного из источников питания позволяет снизить значение полной условно потребляемой мощности и тем самым повысить при прочих равных условиях обобщенный коэффициент полезного действия. Рисунок 4 иллюстрирует данные выводы. Как видно, зависимости  $\eta(U_m)$  имеют точки экстремума, что позволяет рекомендовать при практических разработках шаговых электроприводов снижение амплитуд питающих напряжений на 11–15%. Такие же результаты были получены при исследованиях электроприводов, работающих в режимах вынужденных колебаний и пульсирующего движения за счет различных видов модуляции питающих напряжений (токов).

Рис. 4. Зависимости обобщенного КПД электропривода от амплитуды питающего напряжения  $U_{\beta s, m}$ :  
1 – амплитудно-балансная модуляция;  
2 – фазовая модуляция



### Выводы

1. Предложен метод формирования шагового режима работы асинхронного двигателя за счет амплитудно-балансной модуляции фазных напряжений с прерыванием питания по одной из его обмоток, что обеспечивает более высокие динамические и энергетические показатели электропривода.
2. Разработаны функциональная схема и математическая модель электропривода шагового движения, позволяющая исследовать специальные режимы работы асинхронных двигателей.
3. Показано, что предложенный метод обеспечивает в заданном частотном диапазоне безударный режим работы во время пуска, реверсирования и регулирования шага.
4. Предложено оценить энергетических показателей асинхронного двигателя при шаговом режиме работы производить по обобщенному коэффициенту полезного действия, составляющие которого целесообразно определять, используя интегральные методы расчета.

### Литература

1. Петров И.И. Специальные режимы работы асинхронного электропривода / И.И. Петров, А.М. Мейстель. – М.: Энергия, 1968. – 264 с.
2. Пат. 88874 РФ. МПК Н 02 Р 7/00. Устройство для управления двухфазным асинхронным двигателем в режиме прерывистого движения / А.В. Аристов, Н.А. Воронина (РФ). – № 2009125766/22; заявл. 06.07.09; опубл. 20.11.09. – Бюл. № 32. – 6 с.
3. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
4. Аристов А.В. Безударный пуск асинхронного электродвигателя // Изв. вузов. Электромеханика. – 1993. – № 5. – С. 52–57.
5. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / Под общ. ред. М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.

### Аристов Анатолий Владимирович

Д-р техн. наук, профессор каф. электропривода и электрооборудования НИ ТПУ

Тел.: (382-2) 56-32-55

Эл. почта: Parist@sibmail.com

### Эккерт Иван Александрович

Студент гр. 5АМ2Н Электроэнергетического института НИ ТПУ

Aristov A.V., Ekkert I.A.

### The forming of step operation mode of an induction motor by amplitude balance modulation

In the paper we proposed the method of forming of step operation mode of an induction motor by amplitude modulation of phase voltage supply on one of the windings interruption. The functional circuit and mathematical model of drive is presented. The assessment of the impact load parameters on the output characteristics of drive and energy indicators is made.

**Keywords:** step motion drive, induction motor, amplitude-balance modulation, generalized performance factor.