

АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ ВЕЩЕСТВ

А.В. Аристов, И.А. Эккерт

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, Томск

В основе работы современных средств подготовки, сбора и перемешивания сыпучих веществ широко используется вращательно-колебательное воздействие, позволяющее значительно увеличить производительность технологического процесса, снизить его энергоемкость и улучшить качество смеси градиентов [1]. При этом, вибрационная составляющая воздействия в одних случаях может интенсифицировать основной процесс (например, вибрирование шнека в шнековом смесителе), а в других – вызывать специфические вибрационные эффекты, которые используются для перемешивания (например, циркуляционное вибротранспортирование смеси внутри цилиндрического или торообразного сосуда).

Как правило, технологические установки для перемешивания и транспортировки смесей содержат в своей конструкции два электропривода, один из которых создает медленное вращательное движение вокруг собственной оси, а второй – вибрационное движение с постоянной частотой и амплитудой колебания, параметры которых желательно регулировать в течение технологического процесса. Кроме того, ряд конструкций требует при использовании серийных электродвигателей наличие механического преобразователя движения, что существенно снижает динамические показатели и надежность всей системы в целом.

Данные недостатки технологических установок могут быть существенно снижены, если использовать в их составе только один электропривод, выполненный на базе асинхронного двигателя (АД), работающего непосредственно одновременно сразу в режимах вращательного и периодического движения за счет фазовой модуляции питающих напряжений или токов [2, 3].

Как показывает практика, такие безредукторные электроприводы обеспечивают независимое плавное регулирование на ходу скорости вращения, амплитуды и частоты колебаний практически во всем диапазоне нагрузок и, кроме того, позволяют создавать многокоординатные движения рабочего элемента самых разнообразных форм в зависимости от требований технологического процесса [2].

При проектировании безредукторного электропривода для вибрационного перемешивания сыпучих веществ целесообразно использовать комплексный метод подхода, позволяющий наилучшим образом согласовать все элементы привода между собой и максимально использовать их

потенциальные возможности по динамическим и энергетическим характеристикам как единой целой системы. Последнее невозможно, в первую очередь, без анализа предельных возможностей асинхронного двигателя, работающего непосредственно в режиме периодического движения за счет различных видов модуляций фазных напряжений или токов. Решению данных вопросов и посвящена настоящая статья.

Функциональная схема вибрационного электропривода

На рис. 1 представлена функциональная схема асинхронного электропривода (ЭП) для вибрационного перемешивания сыпучих материалов, выполненного на базе двухфазного АД, работающего непосредственно в режимах вращательно-колебательного движения.

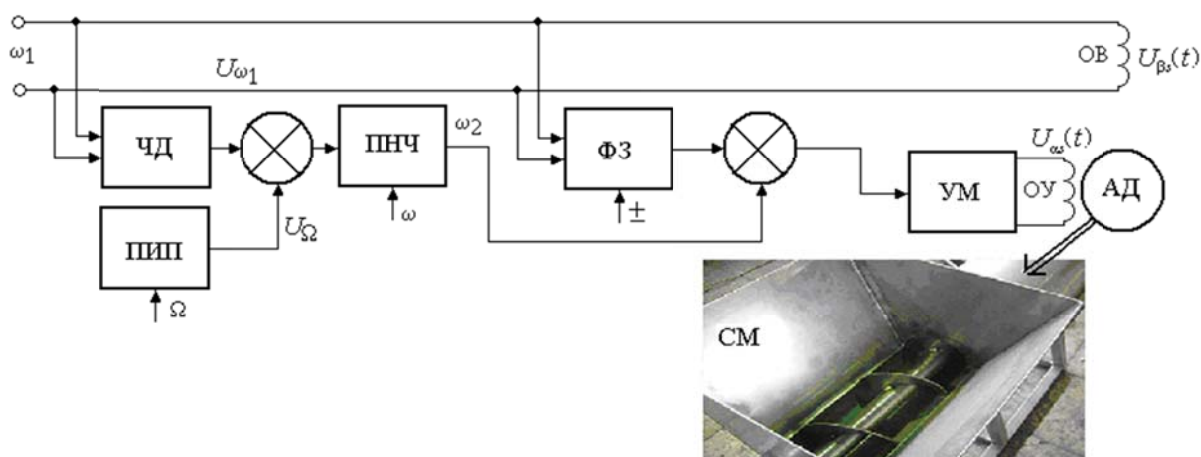


Рис. 1. Функциональная схема асинхронного вибрационного электропривода для перемешивания сыпучих веществ

Она содержит: частотный демодулятор (ЧД), преобразующий частоту напряжения сети ω_1 в пропорциональный уровень постоянного напряжения $U_{\omega 1}$; прецизионный источник питания (ПИП), выполняющий роль задатчика частоты колебаний Ω шнека смесителя; сумматор, формирующий постоянное напряжение пропорциональное частоте $\omega_2 = \omega_1 + \Omega$; преобразователь напряжение частота (ПНЧ), преобразующий входное постоянное напряжение в переменное напряжение частоты ω_2 ; фазосдвигающее звено (ФЗ), осуществляющее сдвиг сетевого напряжения по фазе на угол ± 90 градусов; второй сумматор, для сложения переменных напряжений, поступающих с выхода фазосдвигающего звена и ПНЧ; усилитель мощности (УМ) и рабочий орган – шнековый смеситель (СМ).

Согласно представленной функциональной схеме, принцип формирования колебательно-вращательного закона движения рабочего органа смесителя $\chi(t)$ осуществляется за счет питания фазных обмоток асинхронного двигателя двумя напряжениями:

$$\begin{cases} U_{\alpha s}(t) = U_{m2} \sin(\omega_2 t + \beta) \pm U_{m3} \sin(\omega_1 t + \alpha); \\ U_{\beta s}(t) = U_{m1} \cos(\omega_1 t + \alpha), \end{cases}$$

где U_{m1} , α – амплитуда и начальная фаза напряжения источника переменного тока частоты ω_1 ; U_{m2} , β – амплитуда и начальная фаза напряжения, снимаемого с выхода ПНЧ; U_{m3} – амплитуда выходного напряжения фазосдвигающего звена.

В результате их взаимодействия в воздушном зазоре исполнительного двигателя фазные потокосцепления формируют электромагнитное поле, имеющее две составляющие: вращательную и колебательную. Первая составляющая формируется за счет взаимодействия напряжений:

$$U_{m1}\cos(\omega_1 t + \alpha) \text{ и } \pm U_{m3}\sin(\omega_1 t + \alpha),$$

а вторая –

$$U_{m1}\cos(\omega_1 t + \alpha) \text{ и } U_{m2}\sin(\omega_2 t + \beta).$$

В качестве примера на рис. 2 представлены временные диаграммы, иллюстрирующие изменения скорости $\xi(t)$ и координаты $\chi(t)$ рабочего органа смесителя, выполненного на базе АД, смоделированного в прикладном пакете *Matlab/Simulink* в соответствии с функциональной схемой (рис. 1).

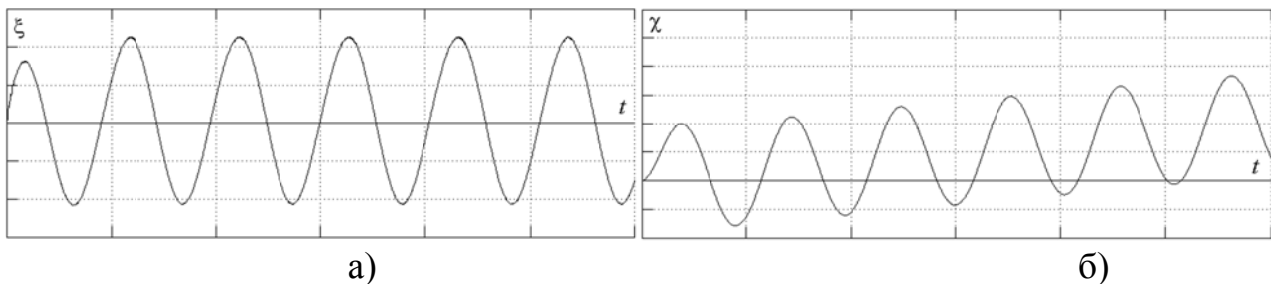


Рис. 2. Законы изменения: а) скорости и б) координаты рабочего органа смесителя

Точность задания и поддержания частоты колебаний шнекового смесителя определяется стабильностью прецизионного регулируемого блока питания постоянного напряжения а регулирование амплитуды колебаний осуществляется за счет изменения амплитуда выходного напряжения U_{m2} преобразователя напряжение-частота.

Регулирование скорости вращения вокруг собственной оси осуществляется изменением величины коэффициента передачи фазового звена, а направление движения – его полярностью.

Предельные характеристики асинхронного двигателя в системах виброперемешивания

Предельная характеристика шнекового смесителя представляет собой поверхность предельного динамического состояния АД, которая определяются, как правило, либо в сило-кинематических

$$\chi, \frac{d\chi}{dt}, \dots, \frac{d^n \chi}{dt^n}; M_{\dot{\chi}}, \frac{dM_{\dot{\chi}}}{dt}, \dots, \frac{d^n M_{\dot{\chi}}}{dt^n},$$

либо в сило-энергетических координатах:

$$\chi M_{\dot{\chi}}, \frac{d(\chi M_{\dot{\chi}})}{dt}, \dots, \frac{d^n (\chi M_{\dot{\chi}})}{dt^n}; M_{\dot{\chi}}, \frac{dM_{\dot{\chi}}}{dt}, \dots, \frac{d^n M_{\dot{\chi}}}{dt^n},$$

где $M_{эм}$ – обобщенный электромагнитный момент, развиваемый асинхронным двигателем; n – порядок дифференцирования. Она, путем сопоставления ее с нагрузочной поверхностью или линией нагрузки, позволяет осуществлять выбор или проектирование исполнительного двигателя. Так, например, в работах [4-5] исследованы упрощенные предельные характеристики электродвигателей постоянного тока и представлены примеры по их практическому использованию.

Если считать, что питание фазных обмоток исполнительного двигателя осуществляется от источников тока, то, как известно, исполнительный двигатель будет работать в режиме источника периодического силовозбуждения. В этом случае развиваемое двигателем усилие не зависит от параметров движения шнека, а предельная характеристика будет представлять собой плоскость, перпендикулярную к оси момента $M_{эм}$ на уровне его максимального значения $M_{эм, max}$.

Для определения предельных характеристик АД, используемого в качестве источника колебательно-вращательного перемещения или мощности, воспользуемся системой уравнений обобщенного электромеханического преобразователя энергии, записанной через потокосцепления

$$\begin{cases} d\Psi_{\alpha s} / dt = -\gamma_r \Psi_{\alpha s} + \gamma_m \Psi_{\alpha r} + U_{\alpha s}; \\ d\Psi_{\beta s} / dt = -\gamma_r \Psi_{\beta s} + \gamma_m \Psi_{\beta r} + U_{\beta s}; \\ d\Psi_{\alpha r} / dt = -\gamma_s \Psi_{\alpha r} + \gamma'_m \Psi_{\alpha s} + U_{\alpha r} - \xi \Psi_{\beta r}; \\ d\Psi_{\beta r} / dt = -\gamma_s \Psi_{\beta r} + \gamma'_m \Psi_{\beta s} + U_{\beta r} + \xi \Psi_{\alpha r}; \\ M_{\dot{\gamma}} = \gamma_m (\Psi_{\beta s} \Psi_{\alpha r} - \Psi_{\alpha s} \Psi_{\beta r}) = M_i \left(\int \xi dt, \xi, d\xi / dt \right), \end{cases} \quad (1)$$

где $U_{\alpha s}, U_{\beta s}, U_{\alpha r}, U_{\beta r}$; $\Psi_{\alpha s}, \Psi_{\beta s}, \Psi_{\alpha r}, \Psi_{\beta r}$ – соответственно напряжения и фазные потокосцепления в обмотках статора и ротора АД по осям α и β ; ξ – обобщенная скорость подвижного элемента двигателя; M_n – обобщенная нагрузка; $\gamma_r, \gamma_s, \gamma_m, \gamma'_m$ – коэффициенты, определяемые выражениями

$$\gamma_r = L_{\alpha r} R_s / (L_{\alpha s} L_{\alpha r} - M^2); \quad \gamma_m = M R_s / (L_{\alpha s} L_{\alpha r} - M^2);$$

$$\gamma_s = L_{\alpha s} R_r / (L_{\alpha s} L_{\alpha r} - M^2); \quad \gamma'_m = M R_r / (L_{\alpha s} L_{\alpha r} - M^2).$$

Здесь $R_s, R_r, L_{\alpha s}, L_{\alpha r}$ – активные сопротивления и полные индуктивности фазных обмоток; M – взаимоиндуктивность между статорными и роторными обмотками двигателя.

Проведя четырех кратное дифференцирование электромагнитного момента $M_{эм}$ во времени t и выразив производные от потокосцеплений через коэффициенты системы (1) можно записать

$$\begin{cases} M_{\dot{y}i} = \gamma_m (\Psi_{\beta s} \Psi_{\alpha r} - \Psi_{\alpha s} \Psi_{\beta r}); \\ \frac{d^n M_{\dot{y}i}}{dt^n} = A_{1,n} \Psi_{\alpha s}^2 + A_{2,n} \Psi_{\beta s}^2 + A_{3,n} \Psi_{\alpha r}^2 + A_{4,n} \Psi_{\beta r}^2 + \\ + A_{5,n} (\Psi_{\beta s} \Psi_{\alpha r} - \Psi_{\alpha s} \Psi_{\beta r}) + A_{6,n} (\Psi_{\alpha s} \Psi_{\alpha r} + \Psi_{\beta s} \Psi_{\beta r}) + A_{7,n}, \end{cases} \quad (2)$$

где $n=1, 2, 3, 4$ – порядок дифференцирования, $A_{i,n}$ – коэффициенты, определяемые параметрами двигателя, источниками питания и движения подвижного элемента двигателя.

Очевидно, что если коэффициенты системы уравнений (2) определены через максимальные значения напряжений питания обмоток исполнительного двигателя, то в параметрическом виде данная система будет представлять собой предельную характеристику с параметрами $\Psi_{\alpha s}, \Psi_{\beta s}, \Psi_{\alpha r}, \Psi_{\beta r}$.

Однако, определить аналитически предельную характеристику в явном виде невозможно, так как для ее нахождения требуется определение из четырех последних уравнений системы (2) значений потокосцеплений через производные от электромагнитного момента, с последующей подстановкой их значений в первое уравнение. При этом возникает задача решения алгебраического уравнения восьмой степени. Тем не менее, в каждом конкретном случае приближенное построение предельной характеристики на основе приближенных численных методов решения алгебраических уравнений, конечно, возможно.

Решения поставленной задачи облегчится, если предельную характеристику искать в виде следов на плоскостях $M_{\text{эм}} - \xi$ (предельная механическая характеристика), $M_{\text{эм}} - d M_{\text{эм}} / dt$ (предельная пусковая характеристика) или $d M_{\text{эм}} / dt - \xi$ (предельная характеристика холостого хода), поскольку соответствующие переменные в системе уравнений (2) приравниваются к нулю. Нагрузочную поверхность или линию нагрузки при этом также представляют в виде следов проекций на тех же плоскостях для сопоставления их с предельной характеристикой двигателя.

Установлено, что процесс построения предельной характеристики можно существенно упростить, если считать, что исполнительный двигатель спроектирован «корректно». Тогда, при максимальных допустимых значениях напряжений питания, в АД формируется максимальное по величине круговое электромагнитное магнитное поле не насыщающее магнитопровод. В этом случае, максимальные значения потокосцеплений обмоток статора и ротора (Ψ_{sm}, Ψ_{rm}) будут определяться соответственно как

$$\Psi_{sm} = \sqrt{\Psi_{\alpha s}^2 + \Psi_{\beta s}^2} - \text{const}, \quad \Psi_{rm} = \sqrt{\Psi_{\alpha r}^2 + \Psi_{\beta r}^2} - \text{const}.$$

Исходя из вышесказанного и введя обозначения $\mu = \Psi_{rm} / \Psi_{sm}$, $\Psi_s = \Psi_{\alpha s} / \Psi_{sm}$, $\Psi_r = \Psi_{\alpha r} / \Psi_{sm}$ первые четыре уравнения системы (1) можно записать как:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\Psi_s}{dt} &= -\gamma_r \Psi_s + \gamma_m \Psi_r + \frac{U_{\alpha s}}{\Psi_{sm}}; \\ \Psi_s \frac{d\Psi_s}{dt} &= \gamma_r (1 - \Psi_s^2) - \gamma_m \sqrt{(\mu^2 - \Psi_r^2)(1 - \Psi_s^2)} - \frac{U_{\beta s}}{\Psi_{sm}} \sqrt{(1 - \Psi_s^2)}; \\ \frac{d\Psi_r}{dt} &= -\gamma_s \Psi_r + \gamma'_m \Psi_s - \xi \sqrt{(\mu^2 - \Psi_r^2)} + \frac{U_{\alpha r}}{\Psi_{sm}}; \\ \Psi_r \frac{d\Psi_r}{dt} &= \gamma_s (\mu^2 - \Psi_r^2) - \gamma'_m \sqrt{(\mu^2 - \Psi_r^2)(1 - \Psi_s^2)} - \xi \Psi_r \sqrt{(1 - \Psi_s^2)} - \frac{U_{\beta r}}{\Psi_{sm}} \sqrt{(\mu^2 - \Psi_r^2)}. \end{aligned} \right.$$

Исключив из полученной системы производные по потокоцеплениям, после алгебраических преобразований получим

$$\left\{ \begin{aligned} \Psi_s(\Psi_r) &= \frac{1}{a_1(\Psi_r)^2 + b_1(\Psi_r)^2} \left[a_1(\Psi_r) c_1 \pm b_1(\Psi_r) \sqrt{a_1(\Psi_r)^2 + b_1(\Psi_r)^2 - c_1^2} \right]; \\ \Psi_r(\Psi_s) &= \frac{1}{a_2(\Psi_s)^2 + b_2(\Psi_s)^2} \left[a_2(\Psi_s) c_2 \pm b_2(\Psi_s) \mu \sqrt{a_2(\Psi_s)^2 + b_2(\Psi_s)^2 - c_2^2} \right]. \end{aligned} \right.$$

где значение коэффициентов системы (4) определяются как:

$$\begin{aligned} a_1(\Psi_r) &= \gamma_m \Psi_r + U_{\alpha s} / \Psi_{sm}; & a_2(\Psi_s) &= \gamma'_m \Psi_s + U_{\alpha r} / \Psi_{sm}; \\ b_1(\Psi_r) &= \gamma_m (\mu^2 - \Psi_r^2)^{0,5} + U_{\beta s} / \Psi_{sm}; & b_2(\Psi_s) &= \gamma'_m (1 - \Psi_s^2)^{0,5} + U_{\beta r} / \Psi_{sm}; \\ c_1 &= \gamma_r; & c_2 &= \gamma_s. \end{aligned}$$

После подстановки полученных значений $\Psi_s(\Psi_r)$ и $\Psi_r(\Psi_s)$ в систему уравнений (2), записанную в относительных переменных Ψ_s и Ψ_r получают предельную характеристику исполнительного двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубнов А. В. Улучшение показателей качества регулирования электропривода сканирующих систем: Монография / А. В. Бубнов, А. Н. Чудинов. – Омск: ОмГТУ, 2012. – 92 с.
2. Луковников В.И. Электропривод колебательного движения. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
3. Аристов А.В. Образование периодических электромагнитных полей в электрических машинах переменного тока// Известия вузов «Проблемы энергетики». – 2014. – № 1–2. – С. 86–93.
4. Петров Б.И. Предельная амплитуда колебаний выходного вала следящего электропривода// – Изв. Вузов. Электромеханика. – 1968. – № 10. – С. 1118–1121.
5. Томасов В.С. Методика анализа электромагнитных процессов энергоподсистемы электропривода постоянного тока в режиме рекуперации / В.С. Томасов В.С., П.А. Борисов, Н.А. Поляков // Вестник ИГЭУ. – 2013. – № 6. – С. 64–70.