

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ВЫБОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСХОДОМЕРА СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ

А.А. Багаев, Р.С. Чернусь

В статье получен критерий выбора электродвигателя центробежного расходомера путем выявления переменных электропривода, которые наиболее быстро реагируют на изменение нагрузки, то есть обладают минимальной инерционностью и постоянной времени.

Ключевые слова: центробежный расходомер, электропривод электромеханическая характеристика, передаточная функция, модульный оптимум, критерий выбора.

Особенностью технологических процессов зерноочистительно-сушильных пунктов, комбикормовых и зерноперерабатывающих предприятий является возможность применения поточной технологии. Стабилизация загрузки машин оказывает значительное влияние на качество работы машин технологической линии. Поточная технология невозможна без использования систем автоматического регулирования, одним из важнейших элементов которых являются устройства измерения расхода.

Расходомеры используются для оперативного контроля производительности различных машин и потоков сыпучих продуктов, а также в качестве датчиков автоматических дозаторов.

Одним из основных требований, предъявляемых к расходомерам сыпучих сельскохозяйственных продуктов, является точность. Точность расходомера является, в том числе, и экономическим фактором, позволяющим уменьшить убытки как производителя сельскохозяйственной продукции, так и потребителя. Погрешность измерения современных центробежных расходомеров составляет порядка 4 %, что существенно превышает показатели зарубежных аналогов [1]. В связи с этим, перспективы расширения области применения центробежных расходомеров связаны с повышением точности.

Как известно динамическая точность системы при случайном характере возмущающего воздействия определяется показателями качества переходных процессов. На показатели качества переходных процессов оказывают влияние механические и электромагнитные инерционности, которые оцениваются соответствующими постоянными времени.

Для повышения быстродействия и точности измерения расхода необходимо оптимизировать переходные процессы во время действия переменной нагрузки. В связи с этим целью исследования является обоснование критерия выбора электродвигателя центробежного расходомера путем выявления переменных электропривода (электромагнитных или механических), которые наиболее быстро реагируют на изменение нагрузки, то есть обладают минимальной инерционностью и постоянной времени.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать зависимость тока статора асинхронного двигателя от скорости;
- получить уравнение электромеханической характеристики двигателя в приращении;
- получить передаточную функцию тока статора по управляющему воздействию;
- проанализировать характер переходного процесса при различных значениях механической и электромагнитных постоянных времени;
- провести сравнительную оценку показателей качества переходных процессов при изменении скорости и тока статора;
- выявить критерий настройки электропривода центробежного расходомера на модульный оптимум.

Механической переменной непосредственно связанной с моментом сопротивления является скорость. Передаточная функция привода центробежного расходомера по скорости получена в [2]. Однако в процессе измерения расхода изменяются и другие переменные привода, например, ток статора, связь которого с моментом сопротивления описывается электромеханической характе-

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ВЫБОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСХОДОМЕРА СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ

ристикой, которую можно получить с использованием линейризованного уравнения динамики расходомера в приращениях [2]:

$$\Delta\omega_1 \left[J_\Sigma p - \left(\frac{\partial M_d}{\partial \omega_1} \right)_0 + \left(\frac{\partial M_c}{\partial \omega_2} \right)_0 i \right] = - \left(\frac{\partial M_c}{\partial Q} \right)_0 \Delta Q, \quad (1)$$

где $i = \frac{\Delta\omega_1}{\Delta\omega_2}$ – передаточное число редуктора;

J_Σ – момент инерции вращающихся масс, приведенный к валу двигателя;

ω_1 – угловая скорость вращения вала двигателя;

M_d – момент на валу двигателя;

M_c – момент сопротивления;

Q – расход материала;

ω_2 – угловая скорость крыльчатки;

Очевидно, что для получения уравнения электромеханической характеристики и передаточной функции по току необходимо выразить скорость ротора через ток статора, для чего воспользуемся известной схемой замещения асинхронного двигателя [3].

Ток намагничивания:

$$\bar{I}_\mu = \bar{I}_1 + \bar{I}'_2 = \bar{I}_1 + \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_{2\Sigma}/s)^2 + x_k^2}}, \quad (2)$$

где \bar{I}_1 – ток статора;

\bar{I}'_2 – приведенный ток ротора;

R_1 – активное сопротивление обмотки статора;

$R'_{2\Sigma}$ – суммарное приведенное активное сопротивление ротора;

x_k – индуктивное сопротивление короткого замыкания;

U_1 – напряжение на обмотке статора;

s – скольжение.

Графики электромеханических характеристик $\omega = f(I_1)$ и $\omega = f(I'_2)$, построенные по формуле (2) с учетом $\omega = \omega_0(1-s)$, приведены на рисунке 1.

При частотах близких к 50 Гц активным сопротивлением обмотки статора R_1 можно пренебречь. При этом $U_1 = U_{1ном} \gg I_1 R_1$.

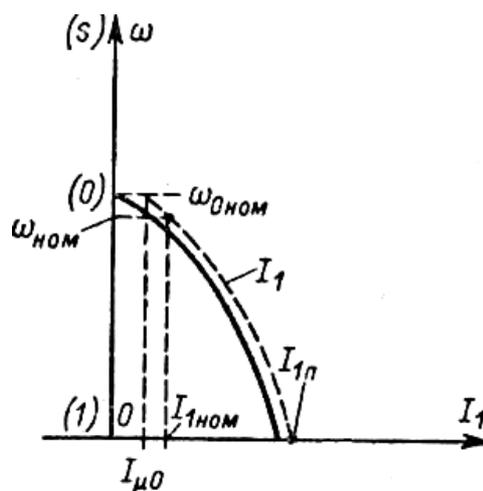


Рисунок 1 – Графики электромеханических характеристик $\omega = f(I_1)$ и $\omega = f(I'_2)$

Анализ рисунка 1 показывает, что кривая $\omega = f(I_1)$ повторяет форму $\omega = f(I'_2)$, так как токи \bar{I}_1 и \bar{I}'_2 связаны соотношением (2). Наибольшее отклонение наблюдается в области холостого хода при $\omega = \omega_0$, $\bar{I}'_2 = 0$ и $\bar{I}_1 = \bar{I}_\mu$.

По мере роста тока ротора кривые сближаются. С увеличением скорости ω уменьшается скольжение, а, следовательно, ток ротора, так как отношение $R'_{2\Sigma}/s$ увеличивается с уменьшением скольжения ($s < 1$). Таким образом, можно считать, что $\bar{I}'_2 \approx \bar{I}_1$ в соответствии с выражением (2):

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_{2\Sigma}/s)^2 + x_k^2}} \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет выразить скольжение через I_1 :

$$s = \sqrt{\frac{R_2^2}{\sqrt{(U_1^2/I_1^2) - x_k^2}}}. \quad (4)$$

$$\text{С другой стороны } s = 1 - \frac{\omega_1}{\omega_0}. \quad (5)$$

В результате совместного решения уравнений (4) и (5) получим уравнение электромеханической характеристики асинхронного двигателя:

$$\omega_1 = \omega_0 - \omega_0 R_2 I_1 \left(U_1^2 - x_k^2 I_1^2 \right)^{-0,5} \quad (6)$$

Анализ (6) показал, что зависимость тока I_1 от ω_1 является нелинейной. Применив метод линеаризации, запишем это уравнение через приращения первого порядка:

$$\Delta \omega_1 = \omega_1' \Delta I_1, \quad (7)$$

$$\text{где } \omega_1' = - \frac{\omega_0 R_2 U_1^2}{3/2 \sqrt{U_1^2 - x_k^2 I_1^2}} = A. \quad (8)$$

Тогда уравнение электромеханической характеристики в приращениях принимает вид:

$$\Delta \omega_1 = - \frac{\omega_0 R_2 U_1^2}{3/2 \sqrt{U_1^2 - x_k^2 I_{10}^2}} \Delta I_1, \quad (9)$$

где I_{10} – ток идеального холостого хода.

С учетом (8) и (9) выражение (1) принимает вид:

$$A \cdot \Delta I \cdot \left[J_{\Sigma} p - \left(\frac{\partial M_{\Delta}}{\partial \omega_1} \right)_0 + \left(\frac{\partial M_c}{\partial \omega_2} \right)_0 \frac{1}{i} \right] = - \left(\frac{\partial M_c}{\partial Q} \right)_0 \Delta Q. \quad (10)$$

Умножив и разделив левую часть уравнения (10) на I_{10} , а правую на Q_0 и обозначив $\alpha = \frac{\Delta I}{I_{10}}$, $q = \frac{\Delta Q}{Q_0}$ запишем его в виде:

$$A \cdot \alpha \cdot I_{10} \cdot \left[J_{\Sigma} p + \left(\frac{\partial M_c}{\partial \omega_2} \right)_0 \frac{1}{i} - \left(\frac{\partial M_{\Delta}}{\partial \omega_1} \right)_0 \right] = - \left(\frac{\partial M_c}{\partial Q} \right)_0 Q_0 q. \quad (11)$$

Разделим левую и правую части уравнения

$$(11) \quad \text{на} \quad \left(\frac{\partial M_c}{\partial \omega_2} \right)_0 \frac{1}{i} - \left(\frac{\partial M_{\Delta}}{\partial \omega_1} \right)_0 :$$

$$A \cdot \alpha \cdot I_{10} \left[\frac{J_{\Sigma}}{\left(\frac{\partial M_c}{\partial \omega_2} \right)_0 \frac{1}{i} - \left(\frac{\partial M_{\Delta}}{\partial \omega_1} \right)_0} p + 1 \right] = - \frac{\left(\frac{\partial M_c}{\partial Q} \right)_0 Q_0}{\left(\frac{\partial M_c}{\partial \omega_2} \right)_0 \frac{1}{i} - \left(\frac{\partial M_{\Delta}}{\partial \omega_1} \right)_0} q. \quad (12)$$

Учитывая уравнение механической характеристики асинхронного двигателя $\frac{\partial M_{\partial}}{\partial \omega_2} = -\beta / (T_{\Sigma} p + 1) \phi$, запишем передаточную функцию тока центробежного расходомера с асинхронным двигателем по возмущающему воздействию Q:

$$W_1(p) = \frac{\alpha}{Q \rightarrow I_1} = - \frac{\left(\frac{\partial M_c}{\partial Q} \right)_0 \frac{Q_0}{A} i (T_{\Sigma} p + 1)}{J_{\Sigma} i T_{\Sigma} p^2 + \left(J_{\Sigma} i + \frac{\partial M_c}{\partial \omega_2} T_{\Sigma} \right) p + \frac{\partial M_c}{\partial \omega_2} + \beta i}, \quad (13)$$

где T_{Σ} – электромагнитная постоянная времени;

β – жесткость механической характеристики.

Введём следующие обозначения:

$$x_1 = \left(\frac{\partial M_c}{\partial Q} \right)_0 \frac{Q_0}{A} i, \quad x_2 = J_{\Sigma} i, \quad x_4 = \frac{\partial M_c}{\partial \omega_2}, \quad x_5 = \beta i. \quad (14)$$

В результате подстановки (14) в уравнение (13) и последующих преобразований получим:

$$W_1(p) = - \frac{(T_{\Sigma} p + 1) x_1}{p^2 x_2 T_{\Sigma} + p(x_2 + x_4 T_{\Sigma}) + x_4 + x_5}. \quad (15)$$

$$\text{С учетом } \beta_1 = \frac{x_2 + x_5}{x_1}, \quad T_m = \frac{x_2 + x_4 T_{\Sigma}}{x_5 + x_4},$$

$$T_{\Sigma} = \frac{x_2 T_{\Sigma}}{x_2 + x_4}, \quad T_{\Sigma} = \frac{1}{\omega_{ном} \cdot s}, \quad (16)$$

передаточная функция колебательного звена принимает вид:

$$W_1(p) = - \frac{T_{\Sigma} p + 1}{\left(p^2 T_{\Sigma} T_m + p T_m + 1 \right) \beta_1} = \frac{1}{\beta_1 \left(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1 \right)}. \quad (17)$$

Связь между параметрами электропривода и колебательного звена имеет вид:

$$T_1 = \sqrt{T_m T_{\Sigma}}, \quad \xi = \frac{T_m}{T_1} = \frac{\sqrt{m}}{2}, \quad m = \frac{T_m}{T_{\Sigma}}. \quad (18)$$

На рисунке 2 представлен ряд зависимостей передаточной функции электропривода $h(t)$ при различных m .

Анализируя графики на рисунке 2, можно установить, что общее время затухания ко-

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ВЫБОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСХОДОМЕРА СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ

лебаний зависит только от T_3 , поскольку

$$T_3 = \frac{T_m}{m} \quad (\text{при } T_m = \text{const}), \text{ следовательно, затухание и частота колебаний однозначно определяются отношением } m. \text{ Только от } m \text{ зависит и логарифмический декримента колебаний}$$

$$\lambda = 2\pi m / \sqrt{4m - m^2} \quad (19)$$

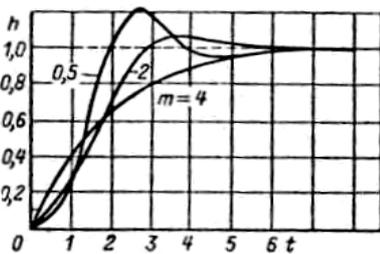


Рисунок 2 – Графики зависимостей передаточной функции электропривода $h(t)$ при различных m

Сравнительная оценка показателей качества переходного процесса при регистрации скорости и тока статора асинхронного двигателя была произведена в моделирующем пакете MatLab. Схема расходомера в среде MatLab приведена на рисунке 3. Параметры двигателя и параметры нагрузки следующие:

- мощность асинхронного двигателя 1,1 кВт;
- момент инерции суммарный 0,026 кг*м²;
- номинальная частота напряжения питания 50 Гц,

$$\omega_0 = 157 \text{ рад/с}, U_1 = 220 \text{ В},$$

$$R_1 = 0,118 \text{ Ом}, R_2 = 0,07 \text{ Ом}$$

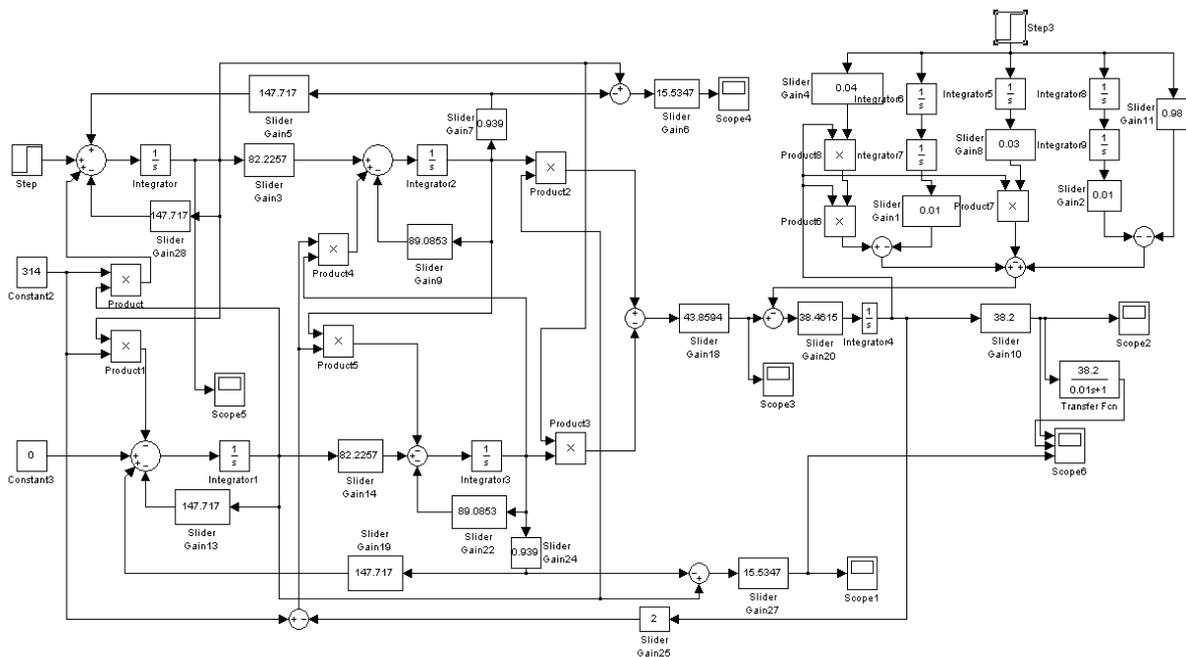


Рисунок 3 – Схема расходомера в среде MatLab

Результаты моделирования представлены на рисунках 4, а и 4, б. На графиках отчетливо определяется время пуска и момент приложения мгновенной нагрузки.

Анализ осциллограмм переходных процессов позволяет сделать следующий вывод: при неизменных параметрах двигателя и момента сопротивления показатели качества переходных процессов при измерении скорости и тока различны. При мгновенном приложении единичной нагрузки, скорость изменя-

ется по аperiodическому закону, а процесс изменения тока носит колебательный затухающий характер. Кроме того, время достижения установившегося значения переменной значительно меньше при регистрации тока. Следовательно, меньшей инерционностью и меньшей постоянной времени обладает процесс изменения тока, поэтому в качестве выходной измеряемой переменной целесообразно использовать именно ток статора.

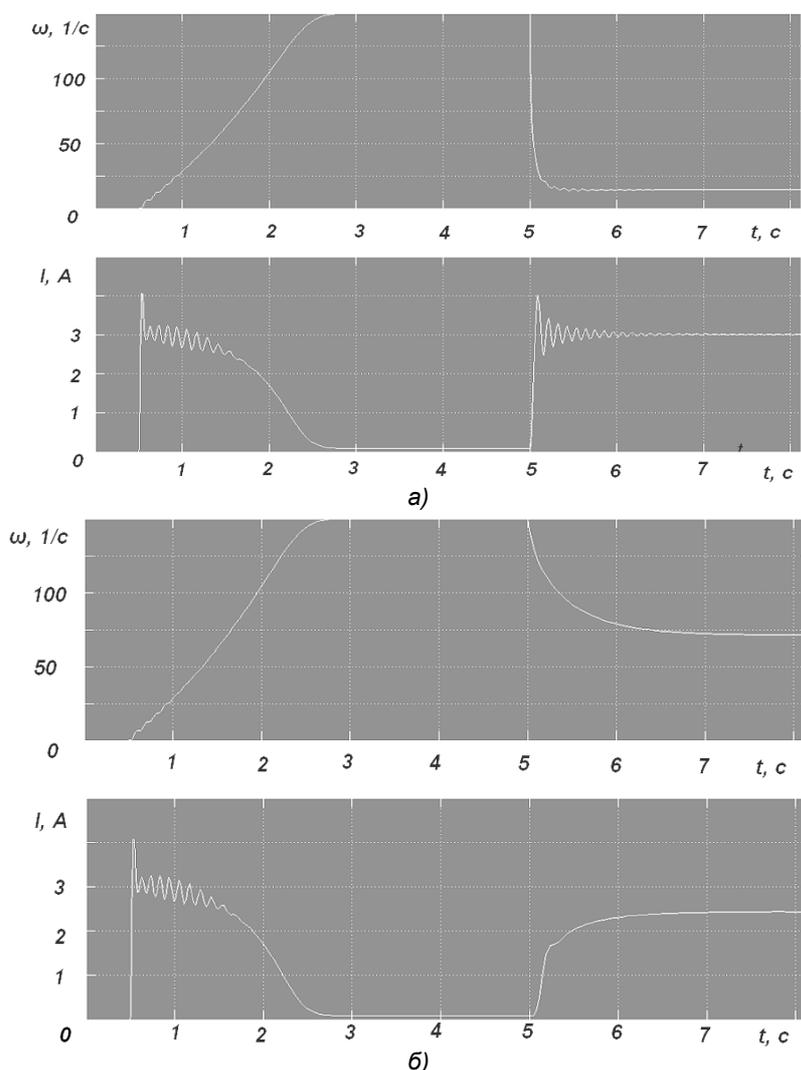


Рисунок 4 – Осциллограммы скорости двигателя и тока статора при пуске двигателя и приложении единичной нагрузки:
а) длина крыльчатки $L=0,1$ м; радиус крыльчатки $R=0,1$ м; б) $L=0,2$ м; $R=0,2$ м

Для повышения точности и улучшения качества переходного процесса целесообразно настраивать электропривод центробежного расходомера на так называемый в теории электропривода модульный оптимум [3], условием настройки на который является равенство:

$$m = \frac{T_m}{T_\sigma} = 2. \quad (20)$$

При этом колебания затухают практически за один период, а скорость электропривода достигает установившегося значения с небольшим превышением его в переходном процессе составляющим около 5 % от установившегося значения.

С учетом сделанных выше обозначений:

$$\frac{(x_2 + x_4 T_\sigma)^2}{(x_4 + x_5) \cdot x_2 T_\sigma} = 2 \quad (21)$$

или

$$\left(\frac{\partial M_c}{\partial \omega_2} \right)^2 T_\sigma^2 - 2i\beta \cdot I_\Sigma T_\sigma + (I_\Sigma i)^2 = 0. \quad (22)$$

Условием единственности решения уравнения (20) является равенство:

$$\frac{2M_k}{\omega_{он} s_k} = \left(\frac{\partial M_c}{\partial \omega_2} \right) \frac{1}{i}. \quad (23)$$

Вывод

Таким образом, равенство (23) позволяет согласовать параметры двигателя, механической передачи с нагрузкой и является критерием выбора двигателя для центробежного расходомера с заданной производительности с учетом принятых выше допущений.

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ВЫБОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО
РАСХОДОМЕРА СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электронный ресурс. – Режим доступа: http://www.flowmeterdirectory.com/flowmeter_artc/flowmeter_artc_02040902.html
2. Багаев, А.А. Передаточная функция центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных продуктов / А.А. Багаев, В.Г. Лукьянов, Р.С.Чернусь // Вестник Алтайского аграрного университета. – Барнаул: Изд-во АГАУ. – № 1 (63). – 2010. – С. 71–75.
3. Ключев, В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
Багаев А.А., д.т.н., проф., зав. каф. «Электрификация и автоматизация с/х», Алтайский государственный аграрный университет, тел. 8(3852)24-91-54;
Чернусь Р.С., ассистент, каф. «Электрификация и автоматизация с/х», Алтайский государственный аграрный университет,
E-mail: chernus.roman@mail.ru