

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ГИРОЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

И. Ф. КАЛИНИН, Б. П. СОУСТИН

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры электрооборудования)

Готовность к работе гиросистемы в первую очередь определяется временем разгона гиродвигателя. Это обстоятельство учитывается при создании гиродвигателей выбором соответствующих конструктивных параметров при заданной величине кинетического момента. Кроме этого используются специальные электрические устройства, форсирующие пуск, в принципе которых лежит два способа [1]:

- 1) пуск при постоянном повышенном напряжении;
- 2) пуск при повышенном напряжении, плавно изменяющемся во времени.

В обоих случаях частота статора остается неизменной. Время изменения скорости вращения ротора гиродвигателя от нуля до установившейся в общем случае определяется из уравнения динамики электропривода

$$t_p = I \int_0^{\omega_y} \frac{d\omega}{M_s - M_c} . \quad (1)$$

Так как момент инерции  $I$  и момент сопротивления  $M_c$  определяются параметрами гиродвигателя, то снижение времени разгона можно осуществить только увеличением электромагнитного момента двигателя. Электромагнитный момент асинхронного гиродвигателя записывается [1]

$$M_s = \frac{10200 m_1 s_1 U_1^2}{\left[ (1 + s_1)^2 + \left( s_1 \frac{x_k}{R_1} \right)^2 \right] \sigma_1 R_1 \omega} , \quad (2)$$

где  $R_1$ ,  $s_1$ ,  $\sigma_1$ ,  $x_k$ ,  $m_1$  — параметры двигателя.

Задавшись допустимым значением напряжения на статоре  $U_1$  или его законом изменения, можно определить величину момента двигателя, и, следовательно, минимальное для этого случая время разгона двигателя. Однако такой пуск нельзя считать оптимальным, так как момент двигателя в начале разгона возрастает, достигая максимального значения при критическом скольжении, а затем уменьшается с увеличением скорости ротора  $\omega$ .

Для уменьшения времени разгона гиродвигателя весьма перспективным может оказаться пуск двигателя при изменении частоты и на-

пряжения, так как в этом случае создаются условия получения максимального постоянного момента двигателя для всего времени разгона.

Процесс пуска асинхронного гиродвигателя при частотном управлении описывается следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} M_s - M_c + I \frac{d\omega}{dt}, \\ \omega = \omega_{1N} (\alpha - \beta), \\ M_s = f(\alpha, \beta), \\ \alpha = \varphi(t). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Здесь

$\alpha = \frac{f_1}{f_{1N}}$  — частота статора, отнесенная к номинальной частоте;

$\beta = \frac{f_2}{f_{1N}}$  — параметр абсолютного скольжения ротора;

$\omega_{1N}$  — угловая скорость вращения поля статора при номинальной частоте  $f_{1N}$ .

При известном законе изменения частоты статора и близком к критическому режиму разгона система уравнений (3) записывается в виде [2]

$$\kappa_\beta \beta - M_c = I \omega_{1N} \left( \frac{d\alpha}{dt} - \frac{d\beta}{dt} \right), \quad (4)$$

где

$$\kappa_\beta = \frac{M_N}{\beta_N}.$$

Если считать, что пуск осуществляется в режиме постоянства магнитного потока, то нетрудно усмотреть, что момент электродвигателя зависит как от изменения скорости ротора, так и от ускорения поля статора. Интегрируя выражение (4) при постоянстве параметра скольжения  $\beta$ , находим зависимость изменения частоты статора при обеспечении  $M = M_{\text{макс}} = \text{пост.}$

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{\kappa_\beta \beta - M_c}{I \omega_{1N}} t. \quad (5)$$

Здесь  $\alpha_0$  — частота статора в момент включения двигателя, численно равная критическому абсолютному скольжению. Время разгона при этом будет определяться формулой

$$t_p = T_N \ln \frac{M_k - M_c - I \varepsilon_k}{I \varepsilon_k}. \quad (6)$$

Здесь

$T_N = I \omega_{1N} \frac{s_N}{M_N}$  — электромеханическая постоянная времени,

$\varepsilon_k = \frac{M_k - M_c}{I \omega_{1N}}$  — критический темп изменения частоты поля

статора и равно сумме времен при  $\alpha = \varphi(t)$  и при  $\alpha = \text{пост.}$

Если имеется возможность изменения частоты статора выше номинальной, то время разгона можно уменьшить. Для этого частота статора увеличивается по (5) до момента, пока скорость ротора не примет своего установившегося значения при номинальной частоте, а затем скачком принимает значение  $\alpha = 1$ . В этом случае величина  $t_p$  при-

ближается к  $T_N$ . Для определения граничного значения частоты используются условия

$$\left. \begin{aligned} \beta_N &= \frac{\omega_{1N} - \omega}{\omega_{1N}}, \\ \beta_{гр} &= \frac{\omega_{гр} - \omega}{\omega_{1N}}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Откуда

$$\alpha_{гр} = \alpha_0 + (1 + \beta_{гр}), \quad (8)$$

где  $\beta_N$  — параметр номинального скольжения в установившемся режиме.

Для определения минимального времени разгона при частотном пуске необходимо отыскание аналитического оптимума. Выражение (3) запишется

$$\left. \begin{aligned} M - \mu &= \frac{dv}{d\tau}, \\ v &= \alpha - \beta, \\ M &= \frac{2\Phi^2 \beta}{1 + \beta^2}, \\ \alpha &= \alpha(t). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Здесь

$$v = \frac{\omega}{\omega_c}, \quad \Phi^* = \frac{\Phi}{\Phi_{опт}}.$$

На (9) накладываются ограничения по количеству тепла, выделяемого в роторе  $Q_{доп}$  и по магнитному потоку  $\Phi$

$$\left. \begin{aligned} \int_0^\tau \frac{2\Phi^2 \beta}{1 + \beta^2} d\tau &\leq Q_{доп} \\ \Phi^* &\leq 1. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Для обеспечения максимума изменения относительной скорости ротора гиродвигателя  $\Delta v$  в единицу времени при соблюдении (10)

$$\Delta v = \int_0^\tau v d\tau \quad (11)$$

необходимо найти зависимости  $\beta(\tau)$  и  $\Phi^*(\tau)$ . Они должны удовлетворять следующему уравнению Эйлера [3, 5]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \Phi^2} - \frac{d}{d\tau} \frac{\partial F}{\partial \Phi^{*2}} &= 0, \\ \frac{\partial F}{\partial v} - \frac{d}{d\tau} \frac{\partial F}{\partial v} &= 0, \\ \frac{\partial F}{\partial \beta} - \frac{d}{d\tau} \frac{\partial F}{\partial \beta} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где

$$F = \frac{2\Phi^2 \beta}{1 + \beta^2} - \lambda_1 v + \lambda \left( v + \mu - \frac{2\Phi^2 \beta}{1 + \beta^2} \right).$$

$\lambda, \lambda_1$  — множители Лагранжа.

Экстремали находятся решением (12)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \Phi^2} &= \frac{2\beta}{1+\beta^2} - \lambda \frac{2\beta}{1+\beta^2}, \\ \frac{d\lambda}{d\tau} &= \lambda \frac{d\mu}{d\nu}, \\ \lambda &= \frac{1}{1-\beta^2}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Из системы уравнений (12) определяется зависимость оптимального изменения частоты ротора при минимальном времени разгона

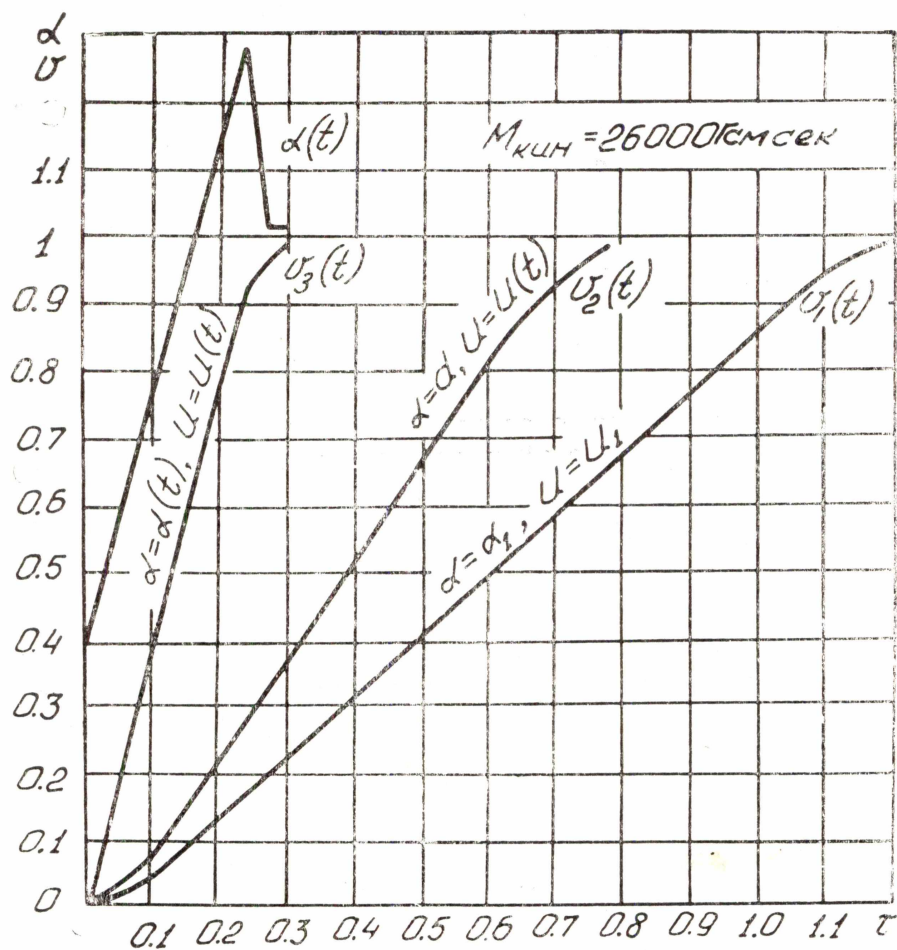


Рис. 1. Характеристики разгона гидродвигателя при обычном и частотном управлении

двигателя для различных зависимостей момента нагрузки от скорости ротора

при  $\mu = \text{пост.}$

$$\lambda = c_1 - \lambda_1 \tau, \quad (14)$$

при  $\mu = \kappa_1 \nu$

$$\lambda = c_2 - \kappa_1 \lambda_2 \exp(\kappa_1 \tau), \quad (15)$$

при  $\mu = \kappa_2 \nu^2$

$$\lambda = c_3 - \kappa_2 \lambda_3 \exp(\kappa_2 \nu t). \quad (16)$$



Для гироскопического двигателя с  $M_{\text{кин}} = 26000 \text{ гсм/сек}$  были проведены экспериментальные исследования по обычному и частотному пуску (рис. 1). При амплитудно-частотном управлении частота статора изменялась по закону, близкому (5). Время разгона сократилось в 4 раза по сравнению с пуском при повышенном напряжении и  $\alpha = \text{пост.}$

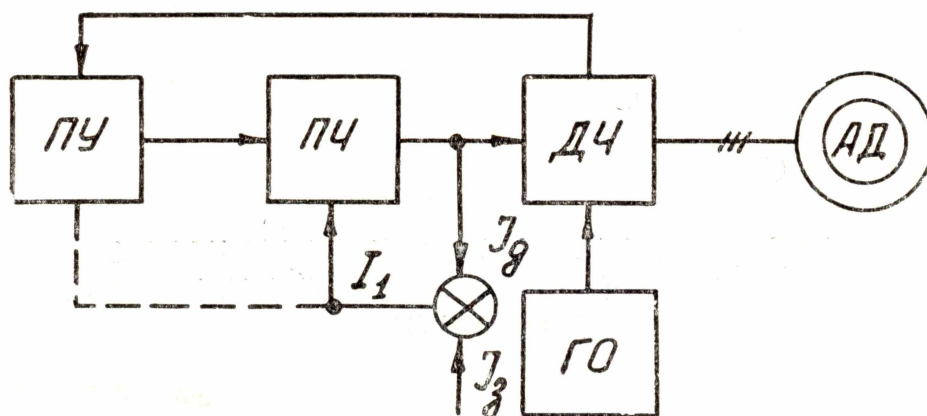


Рис. 2. Блок-схема системы оптимального управления скоростью гиродвигателя

При практической реализации системы оптимального управления по схеме рис. 2 преобразователь частоты (ПЧ) выполняется на основе тиристорного инвертора тока. Момент конца разгона и начала торможения осуществляется переключающим устройством (ПУ), управляемого либо сигналом  $I_1$ , либо датчиком частоты (ДЧ) и генератором опроса (ГО).

Аналогичные исследования проводятся в работе [4].

В заключение следует отметить, что при частотном управлении асинхронными двигателями для получения больших ускорений, отсутствуют пики тока, что особенно важно при пуске, торможении и реверсировании двигателя с источником ограниченной мощности. Это обстоятельство позволяет использовать меньший по мощности источник питания либо при выбранном источнике получать максимальное быстродействие.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сб. статей под ред. докт. техн. наук проф. А. И. Бертинова. Бесконтактные и униполярные электрические машины. Машиностроение, 1966.
2. А. А. Булгаков. Частотное управление асинхронными электродвигателями. М., «Наука», 1966.
3. А. А. Фельдбаум. Основы теории оптимальных автоматических систем. Физматгиз, 1963.
4. P. I. Lawreson, I. M. Stephenson. Note on induction-machine performance with a variable-frequency Supply. Proc. Instn. Electr. Engrs. 1966, 111, N 10.
5. Ю. П. Петров. Оптимальное управление электроприводом. ГЭИ, 1961.