

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

И. Ф. КАЛИНИН, В. И. ПАНТЕЛЕЕВ, Б. П. СОУСТИН

(Представлена научным семинаром кафедры электрооборудования)

Рациональное управление асинхронной машиной заключается в регулировании скорости вращения ротора двигателя при обеспечении требуемого качества переходного процесса пуска, реверса, торможения. Преимущества регулируемых асинхронных электроприводов с частотным управлением общеизвестны. При этом выбор рационального закона частотного управления асинхронной машиной является предметом особого рассмотрения для каждого режима производственного механизма. С этой целью выражение для электромагнитного момента запишем в виде, удобном для оценки различных случаев частотного регулирования.

$$M = \frac{m_1 (c_1 f_{1N} \Phi)^2}{\omega_{1N} \left( \frac{r'_2}{\beta} + \frac{\beta}{r'_2} x_2'^2 \right)} = \frac{m_1 (c_1 f_{1N} I_2)^2}{\omega_{1N} f_2^2 \left( \frac{r'_2}{\beta} + \frac{\beta}{r'_2} x_2'^2 \right)}. \quad (1)$$

Соответственно уравнению (1) можно выделить большое разнообразие способов регулирования. Так, для наиболее эффективного режима работы асинхронной машины при  $\Phi = \text{const}$  могут использоваться управляющие параметры  $\Phi - I_1$ ,  $\Phi - f_2$ ,  $I_1 - f_1$ ,  $I_1 - f_2$ ,  $I_2 - f_2$  и другие.

Основная трудность при реализации режима  $\Phi = \text{const}$  заключается в измерении потока. В настоящее время нет простых и надежных способов измерения магнитного потока, а также э. д. с. и электромагнитного момента, поэтому представляют интерес системы, построенные на основе частотно-токового способа управления. Из выражения (1) следует, что если в процессе регулирования поддерживать постоянными величины тока статора  $I_1$  и частоту тока ротора  $f_2$ , то значения величин тока намагничивания, следовательно, и потока окажутся также постоянными. Задавая значения  $I_1$  и  $f_2$ , можно поддерживать некоторый оптимальный (с точки зрения потерь) поток  $\Phi$  двигателя [1]. При исследовании динамики двигателя с учетом электромагнитных процессов использовалась АВМ типа МН-14.

Дифференциальные уравнения электромагнитных процессов в асинхронном двигателе во вращающейся системе координат имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} U_c &= i_c R_c + \frac{d}{dt} (L_c i_c + L_m i_p) + j\omega_\kappa (i_c L_c + i_p L_m), \\ U_p &= i_p R_p + \frac{d}{dt} (i_p L_p + i_c L_m) + j\Delta\omega (i_c L_m + i_p L_p), \\ M_g &= \operatorname{Re} [jL_m (i_p^* i_c)], \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M_g - M_c. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Совместное решение второго и третьего уравнений системы (2) при  $\Delta\omega = \text{пост.}$ ,  $i_c = \text{пост.}$ , дает следующее выражение момента:

$$\begin{aligned} M &= \frac{\Delta\omega L_m^2 i_c^2 R_p}{R_p^2 + \Delta\omega^2 L_p^2} + \frac{\Delta\omega^2 L_m^2 i_c^2 L_p}{R_p^2 + \Delta\omega^2 L_p^2} \sin \Delta\omega t \exp\left(-\frac{t}{T_p}\right) - \\ &- \frac{\Delta\omega L_m^2 i_c^2 R_p}{R_p^2 + \Delta\omega^2 L_p^2} \cos \Delta\omega t \exp\left(-\frac{t}{T_p}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Очевидно, что электромагнитный момент создается как параметром ( $L_c^2$ ), так и параметром ( $\Delta\omega$ ), что позволяет получать значительный перегрузочный момент (при пуске двигателя) за счет управления параметром ( $\Delta\omega$ ), когда дальнейшее повышение тока статора нецелесообразно ввиду насыщения машины. Интерес представляет исследование процессов при пуске асинхронного двигателя с переменным моментом нагрузки. В этом случае при пуске со стабильными параметрами скольжения и тока статора электромагнитный момент не сохраняется постоянным.

В быстродействующем приводе (при максимальном моменте) эта зависимость проявляется слабо [3].

Однако в приводе с ограниченной мощностью источника питания двигатель не развивает максимального момента. В подобной системе изменение момента нагрузки оказывает заметное влияние на динамическую характеристику двигателя. В режиме ограниченного тока статора абсолютное скольжение также должно быть ограничено. Причем ограничение абсолютного скольжения необходимо как для снижения потерь, так и для увеличения быстродействия.

Оптимальное значение абсолютного скольжения (рис. 1) находится из условия получения максимального суммарного момента двигателя, который определяется как интеграл выражения (3):

$$\begin{aligned} \text{Макс (EM)} &= \int_0^\infty \frac{\Delta\omega_{\text{опт}} L_m^2 i_c^2 R_p}{R_p^2 + \Delta\omega_{\text{опт}}^2 L_p^2} dt + \int_0^\infty \frac{\Delta\omega_{\text{опт}} L_m^2 i_c^2 L_p}{R_p^2 + L_p^2 \Delta\omega_{\text{опт}}^2} \sin t \Delta\omega_{\text{опт}} \exp \times \\ &\times \left(-\frac{t}{T_p}\right) dt - \int_0^\infty \frac{L_m^2 i_c^2 R_p \Delta\omega_{\text{опт}}}{R_p^2 + L_p^2 \Delta\omega_{\text{опт}}^2} \cos t \Delta\omega_{\text{опт}} \exp\left(-\frac{t}{T_p}\right) dt. \end{aligned} \quad (4)$$

Конкретная оптимизация электромагнитных процессов при частотно-токовом управлении проведена на АВМ для двигателя ДАТ-250-8

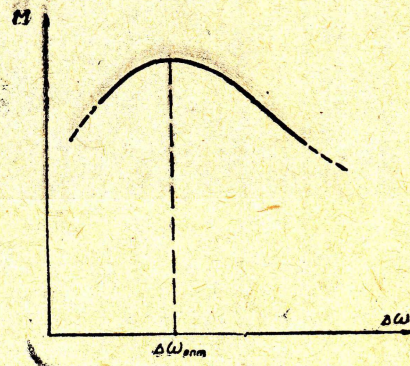


Рис. 1

(см. приложение). Исследовались пуск двигателя при неизменном, линейном и экспоненциальном во времени законах изменения напряжения и частоты  $f_1$  для постоянного момента нагрузки, а также для линейно и квадратично зависящего от скорости вращения (рис. 2 а—г).

Из сопоставления этих законов управления видно, что меньшее время пуска и лучшее формирование переходного процесса (с малым

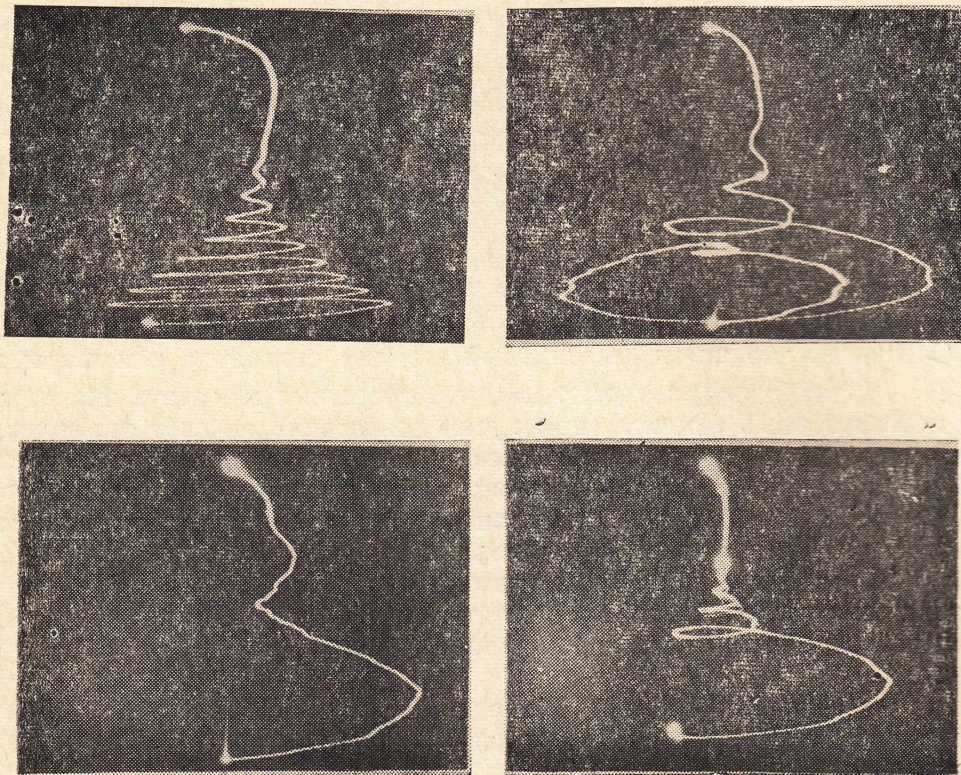


Рис. 2 а, б, в, г

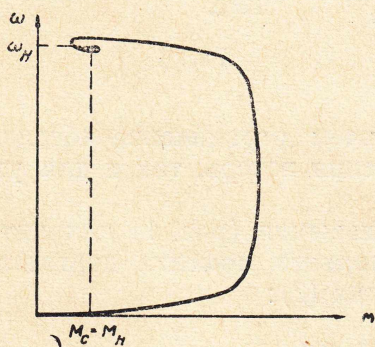


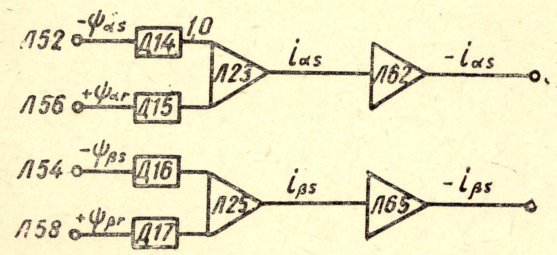
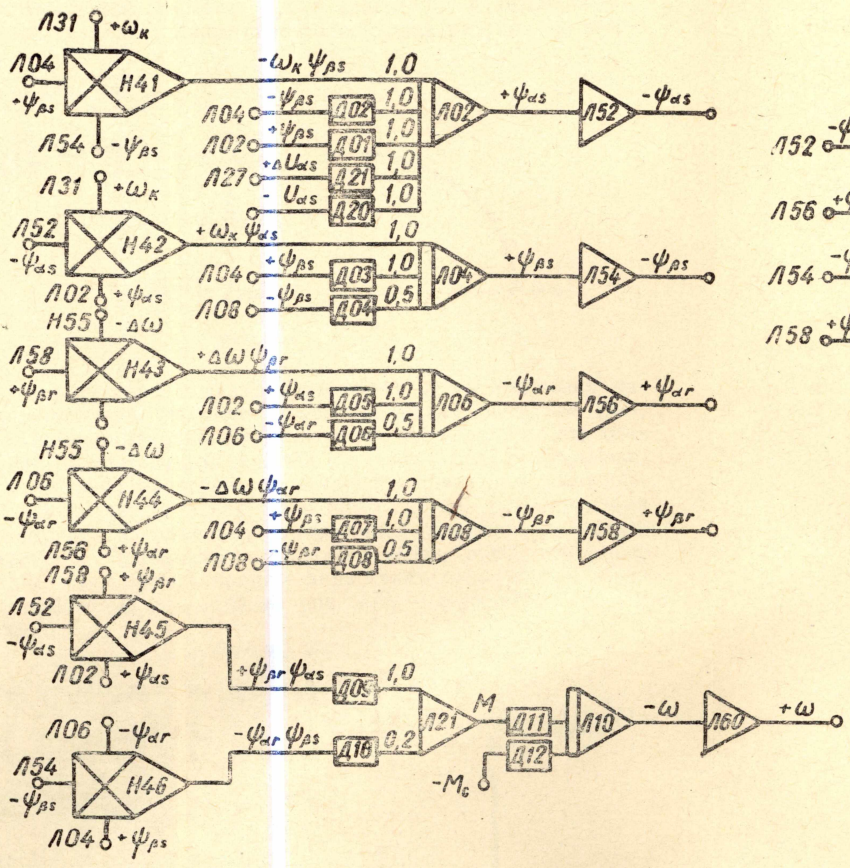
Рис. 2 д

перерегулированием) соответствует экспоненциальному во времени закону регулирования напряжения и частоты сети. В замкнутой системе управления током статора и абсолютным скольжением получены динамические характеристики с неизменным (заданным) моментом двигателя (рис. 2 д). Экспериментально найденное (на АВМ) оптимальное значение частоты ротора ( $f_2$ ) в 2,5 раза меньше критической при ограниченном (на уровне  $2I_{ном}$ ) токе статора.

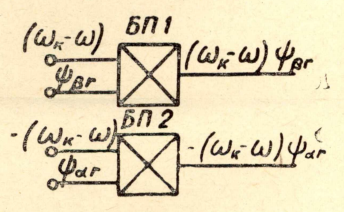
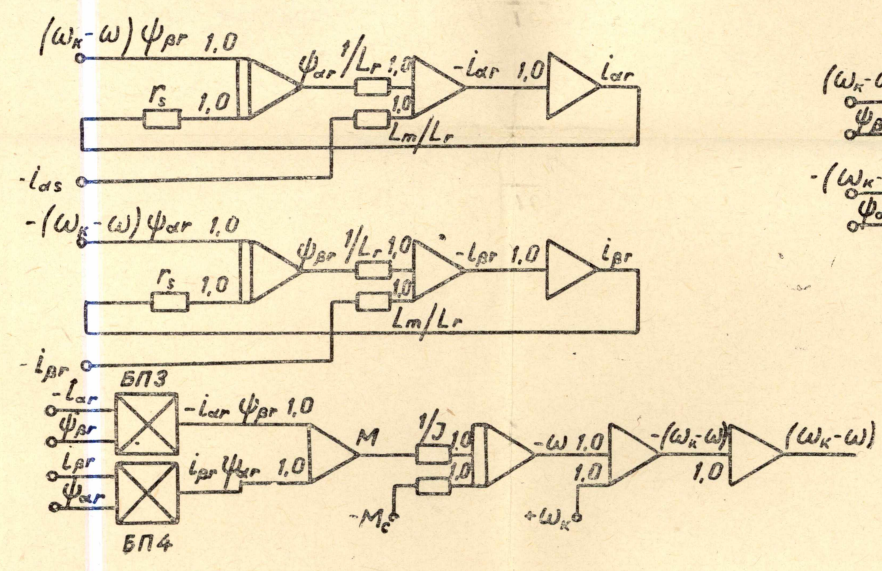
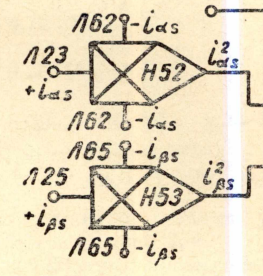
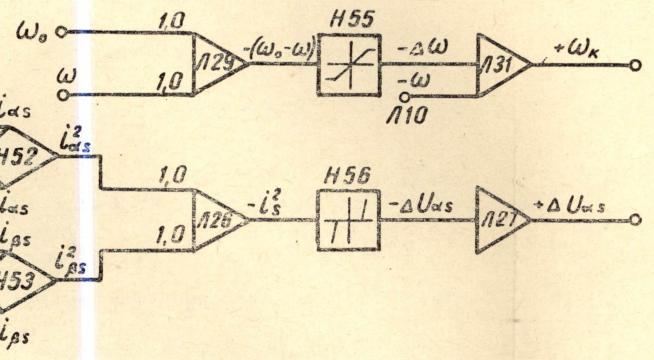
Следует иметь в виду, что структурная схема модели двигателя

при управлении током статора и частотой ротора может быть существенно упрощена (рис. 3, б), так как ток и скольжение могут рассматриваться как независимые управляющие параметры. В этом случае исследование переходных процессов в асинхронном двигателе может проводиться по уравнениям, описывающим процессы в роторе, и уравнению для момента. Подобная схема позволяет исследовать динамику

a)



- $D_{08} = \alpha'_s/2 = 0,148$
- $D_{02} = K_r \alpha'_s/10 = 0,028$
- $D_{03} = \alpha'_s = 0,295$
- $D_{04} = K_r \alpha'_s/2 = 0,139$
- $D_{05} = K_s \alpha'_r = 0,277$
- $D_{06} = \alpha'_r/2 = 0,149$
- $D_{07} = K_s \alpha'_r = 0,277$
- $D_{08} = \alpha'_r/2 = 0,149$
- $D_{09} = K_r/105 X_s = 0,472$
- $D_{10} = K_r/56 X_s = 0,945$
- $D_{11} = 16/J = 0,282$
- $D_{12} = 16/J = 0,282$
- $D_{14} = \frac{1}{25} \frac{1}{6} X_s = 0,2$
- $D_{15} = \frac{1}{10} K_r/6 X_s = 0,472$
- $D_{16} = \frac{1}{25} \frac{1}{6} X_s = 0,2$
- $D_{17} = \frac{1}{10} K_r/6 X_s = 0,472$
- $D_{20} = 0,05$
- $D_{21} = 0,123$



замкнутой системы регулирования скорости и момента двигателя на малых АВМ.

Блок-схема замкнутой системы пуска двигателя с независимым управлением  $\Delta\omega$  и заданным током статора показана на рис. 4 а. Фор-

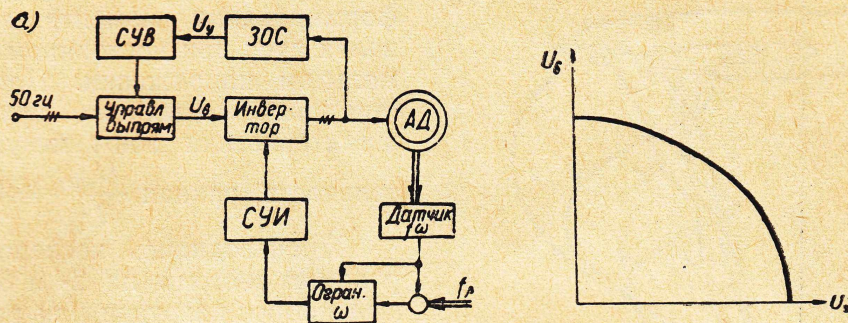


Рис. 4

мирование частоты статора в схеме происходит путем сложения частоты, пропорциональной скорости вращения вала двигателя ( $f\omega$ ), и частоты ( $f_\beta$ ), пропорциональной абсолютному скольжению. Эти операции выполняет бесконтактный сельсин. Силовая часть преобразователя частоты выполнена на основе тиристорного инвертора, питающегося от управляемого выпрямителя. Замкнутая система регулирования напряжения построена по принципу задержанной стабилизации заданного тока двигателя. Задержанная обратная связь, ЗОС, с отсечкой по току позволяет форсировать процесс нарастания тока статора в момент трогания двигателя ( $U_y = 0$  на рис. 4 б) и ограничить ток на заданном уровне.

#### Приложение

уравнения аналога-машины для двигателя ДАТ-250-8 имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d\psi_{as}}{dt} &= -U_{as} + \alpha'_s \psi_{as} - \omega_k \psi_{\beta s} - 0,277\psi_{ar} \\ -\frac{d\psi_{\beta s}}{dt} &= 0,295\psi_{\beta s} + \omega_k \psi_{as} - 0,277\psi_{\beta r} \\ \frac{d\psi_{ar}}{dt} &= -0,299\psi_{ar} + (\omega_k - \omega) \psi_{\beta r} + 0,277\psi_{as} \\ \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} &= -0,299\psi_{\beta r} - (\omega_k - \omega) \psi_{ar} + 0,277\psi_{\beta s} \\ M_g &= 4,72 (\psi_{\beta s} \psi_{ar} - \psi_{as} \psi_{\beta r}) \\ \frac{d\omega}{dt} &= 0,282 (M_g - M_c) \\ i_{as} &= 5,02\psi_{as} - 4,72\psi_{ar}, \quad i_{\beta s} = 5,02\psi_{\beta s} - 4,72\psi_{\beta r}. \end{aligned} \right\} \alpha'_s = 0,295$$

Масштабы переменных принимались

$$m_{U_s} = 1:4; \quad m_M = 1:16; \quad m_I = 1:5; \quad m_t = 1:1.$$

Схема модели замкнутой системы регулирования скорости и момента АД изображена на рис. 3, а.

Оптимальные значения абсолютного скольжения определялись поисковым моделированием. Было определено, что при оптимальном значении абсолютного скольжения система неустойчива (рис. 5).

В этом случае скорость достигает своего номинального значения быстрее, но далее начинаются неустойчивые колебания момента и скорости.

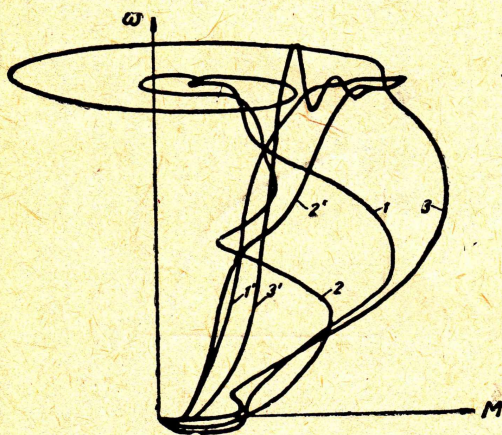


Рис. 5

При увеличении крутизны характеристики задержанной ОС по току наблюдалось замедление формирования момента, затягивался пуск при постоянном минимальном напряжении. Наиболее приемлемой оказалась крутизна характеристики зоны нечувствительности, равная  $\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 6$ .

Производилось исследование реакции системы на 2- и 3-кратный наброс нагрузки при различной скорости вращения двигателя. При набросе нагрузки на скорости  $(0,1 \div 0,4) \omega_N$  наблюдалось резкое возрастание вращающего момента, которое переходит в неустойчивые колебания при достижении скорости порядка номинальной.

При набросе нагрузки на скорости 0,6 и более от номинальной наблюдалось незначительное возрастание вращающего момента и несколько замедлялся пуск.

### Выводы

1. Проведенные исследования показали, что при поддержании постоянными значений  $f_2$  и  $I_1$  электромагнитный момент двигателя в динамических режимах сохраняется постоянным лишь для случая неизменного (не зависящего от скорости) момента сопротивления. При моменте сопротивления, зависящем от скорости, в режиме  $I_1 = \text{const}$  для получения постоянного электромагнитного момента в динамических режимах, частота ротора изменяется по определенному закону при оптимизации системы для различных видов нагрузок двигателя.
2. Автоматическим регулированием тока и частоты ротора можно получить любые механические характеристики, в том числе характеристики, свойственные двигателям постоянного тока.
3. Для каждого значения  $I_1 = \text{const}$  имеется оптимальное абсолютное скольжение, при поддержании значения его постоянным система становится неустойчивой, поэтому рекомендуется производить пуск двигателя при значениях абсолютного скольжения, несколько больших оптимального.

### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Ф. Калинин, Б. П. Соустин. Оптимальный по быстродействию разгон асинхронного гидродвигателя. Сб. докладов 5-й научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства, Изд. ТГУ, Томск, 1967.
2. М. М. Соколов и др. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном приводе. «Энергия», М., 1967.
3. В. И. Рябуха. Процессы в асинхронном двигателе при частотном регулировании скорости его вращения по заданному закону. Изв. АН СССР, «Энергетика и транспорт», Л., № 2, 1966.
4. Ю. Ф. Берсенев. Вопросы динамики асинхронного двигателя при частичном регулировании скорости. Автоматизация производственных процессов. Вып. 5, Новосибирск, 1967.
5. Л. Д. Гильдебранд, Н. И. Зенкин, В. М. Кирпичников. Выбор структурной схемы аналоговой модели А. Д., Изв. вузов «Электромеханика», М., № 2, 1967.