

## О ЗАКОНАХ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЯХ

Шабанов В.А., Кабаргина О.В.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет  
email: ShabanovVA1@yandex.ru*

*В статье рассматриваются законы частотного регулирования синхронных двигателей в прямых скалярных системах частотного регулирования. Приведены законы частотного регулирования электродвигателей на головных и промежуточных нефтеперекачивающих станциях, а также механические характеристики при частотном регулировании.*

*Ключевые слова: синхронный двигатель, прямое частотное регулирование, скалярные системы, законы частотного регулирования, запас статической устойчивости, нефтеперекачивающая станция, магистральный трубопровод*

В настоящее время большое внимание уделяется разработке частотно-регулируемых электроприводов магистральных насосов трубопроводного транспорта нефти. Для привода магистральных насосов (МН) на нефтеперекачивающих станциях широко применяются синхронные двигатели (СД) серии СТД. Все виды частотного регулирования СД делят на два вида: прямое частотное регулирование или регулирование без самосинхронизации, и регулирование по системе вентильного двигателя или регулирование с самосинхронизацией. Технологический режим транспорта нефти не предъявляет повышенных требований к быстродействию системы управления электроприводом. Поэтому наибольший интерес для частотно-регулируемых синхронных электроприводов МН представляют скалярные системы прямого частотного регулирования. В системах частотного регулирования СД можно воздействовать на три параметра: напряжение, частоту и ток возбуждения. В статье рассматривается учет режима работы МН при выборе законов частотного регулирования СД.

При использовании относительных единиц электромагнитный момент СД определяется выражением [1]:

$$M = \frac{3 \cdot \gamma U_{НОМ} \cdot I_f \cdot x_{ad}}{\omega_0 \cdot x_d \cdot \alpha} \sin \delta, \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение питания СД;

$x_d$  – индуктивное сопротивление по продольной оси;

$\delta$  – угол нагрузки машины;

$x_{ad}$  – сопротивление взаимоиנדукции между обмотками статора и ротора;

$$\gamma = \frac{U_{1\phi}}{U_{1ном}}; \alpha = \frac{f_1}{f_{1ном}}, \quad (2)$$

где  $U_{1\phi}$  и  $U_{1ном}$  – текущее и номинальное фазные напряжения;

$f_1$  и  $f_{1ном}$  – текущая и номинальная частота.

Разделим обе части выражения (1) на номинальный момент  $M_{ном} = P_{ном} / \omega_{ном}$ . После математических преобразований, с учетом того, что  $\omega_0 = 2\pi f = 2\pi \alpha f_{ном}$ , получим выражение максимального электромагнитного момента  $M_m$  при  $\sin \delta = 1,0$  в виде [2, 3]:

$$\mu_m = i_f \cdot \frac{\gamma}{\alpha}. \quad (3)$$

где  $\mu_m = M_m / M_{ном}$ ;

$i_f = \frac{I_B x_{ad}}{I_{ном} x_d}$  – относительное значение тока возбуждения.

В скалярных системах для сохранения запаса статической устойчивости используется условие, при котором во всем диапазоне регулирования скорости поддерживается постоянной перегрузочная способность двигателя

$$\mu_m = \lambda_m, \quad (4)$$

где  $\lambda_m = \frac{M_{м.ном}}{M_{.ном}}$ ,

где  $M_{м.ном}$  – максимальное значения момента при номинальной частоте.

При этом из выражения (3) при выполнении условия сохранения постоянной перегрузочной способности (4) получаем следующий закон частотного регулирования СД

$$\gamma \cdot i_f = \mu \cdot \alpha. \quad (5)$$

На головных нефтеперекачивающих насосных станциях магистральные центробежные насосы работают в условиях отсутствия противодействия. Такие насосы имеют механическую характеристику, близкую к квадратичной (кривая 1 на рис. 1) и  $\mu = \alpha^2$ .

При этом уравнение (5) принимает вид

$$\gamma \cdot i_f = \alpha^3 \quad (6)$$

с максимальным моментом, пропорциональным квадрату частоты (кривая 1 на рис. 2).

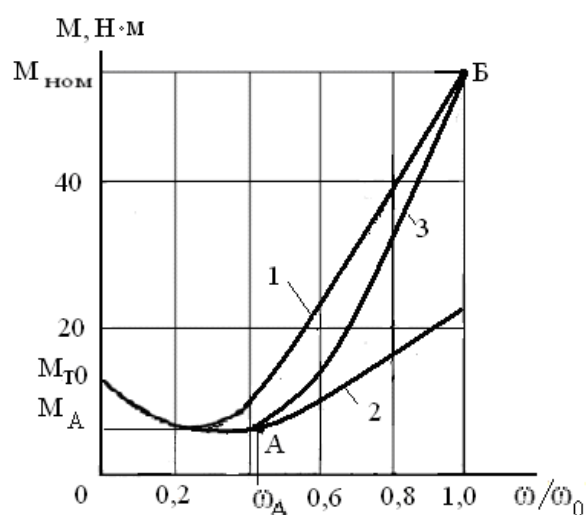


Рисунок 1. Механические характеристики магистрального насоса

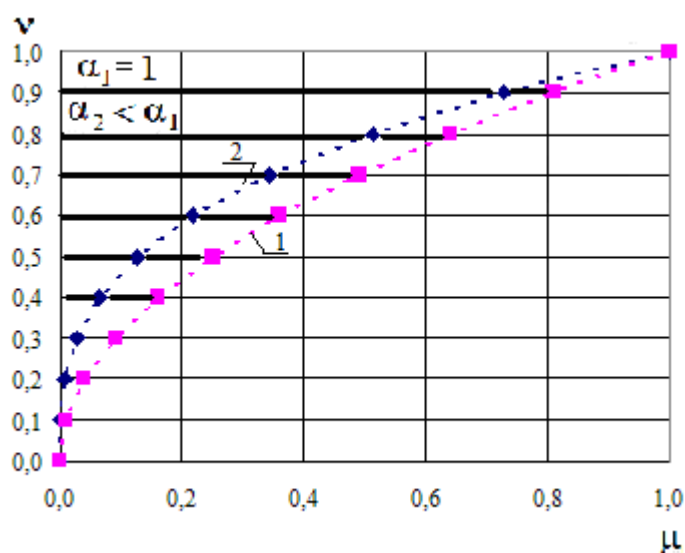


Рисунок 2. Механические характеристики СД при частотном управлении по закону  $\gamma \cdot i_f = \alpha^3$  с максимальным моментом  $\mu_{МАКС} = \lambda_m \alpha^2$  (кривая 1) и  $\gamma \cdot i_f = \alpha^4$  с максимальным моментом  $\mu_{МАКС} = \lambda_m \alpha^3$  (кривая 2)

На промежуточных насосных станциях магистральные насосы транспорта нефти работают в условиях противодействия. При этом их механическая характеристика (кривая 3 на рис. 1) зависит от режима перекачки и от положения обратного клапана в обвязке насоса. При последовательном включении насосов и работе по системе «из насоса в насос» механическая характеристика зависит от подачи и напора, при которых происходит открытие или закрытие обратного клапана [4].

Приближенно зависимость момента сопротивления таких насосов от частоты вращения можно представить в виде

$$\mu = \alpha^n, \quad (7)$$

где показатель степени  $n$  может принимать значения 3, 4 и т.д. вплоть до 10 и более. При этом из (5) получаем

$$\gamma \cdot i_f = \alpha^{n+1}. \quad (8)$$

При этом  $\mu = \alpha^3$  закон регулирования  $\gamma \cdot i_a = \alpha^4$ . При этом законе регулирования механические характеристики СД и кривая максимального момента (кривая 2) приведены на рис. 2.

В выражения (5), (6) и (8) входит ток возбуждения. Возможность регулирования тока возбуждения влияет на соотношения между напряжением и частотой при регулировании СД. При этом можно либо задавать закон управления током возбуждения и подбирать закон изменения напряжения, либо задавать закон управления напряжением и частотой и определять требуемый закон изменения тока возбуждения. Например, при постоянном токе возбуждения из (5) получаем, что частоту и напряжение питания СД следует изменять по закону  $\gamma = \mu \cdot \alpha$ . Возможные законы управления напряжением, частотой и током возбуждения СД на нефтеперекачивающих станциях при частотном регулировании приведены в табл. 1.

В режимах работы регулируемого МН без противодействия управление напряжением, частотой и током возбуждения может выполняться по уравнениям  $\gamma = \alpha^2$  и  $i_f = \alpha$ . В режимах с противодействием частотное регулирование может выполняться по уравнениям  $\gamma = \alpha^2$ ,  $i_f = \alpha^{n-1}$ . Если в частотном преобразователе используется пропорциональный закон регулирования напряжения  $U/f = \text{const}$  (в относительных единицах  $\gamma = \alpha$ ), то ток возбуждения следует регулировать по закону  $i_f = \mu$ .

Таблица 1

## Законы частотного управления СД на НПС

Режим работы МН или системы возбуждения	Закон управления	Управление током возбуждения
Режимы без противодействия $\mu = \alpha^2$	$\gamma \cdot i_f = \alpha^3$	При $\gamma = \alpha^2$ $i_f = \alpha$
Режимы с противодействием $\mu = \alpha^n$	$\gamma \cdot i_f = \alpha^{n+1}$	При $\gamma = \alpha^2$ $i_f = \alpha^{n-1}$
Постоянный ток возбуждения	$\gamma = \mu \cdot \alpha$	$i_f = 1$
Ток возбуждения пропорционален моменту нагрузки	$\gamma = \alpha$	$i_f = \mu$
Ток возбуждения пропорционален частоте	$\gamma = \mu$	$i_f = \alpha$

Полученные выражения для частотного регулирования СД отличаются от уравнений, описывающих законы частотного регулирования асинхронных двигателей АД [5, 6]:

$$\gamma = \alpha \sqrt{\mu_c}. \quad (9)$$

Законы частотного регулирования АД и СД будут совпадать только в том случае, если ток возбуждения СД изменяется пропорционально отношению

$$i_f = \gamma / \alpha \quad (10)$$

и выражение (5) преобразуется в (9). Таким образом, если ток возбуждения СД изменять по выражению (10), то законы частотного регулирования АД и СД совпадают и для частотного регулирования СД применимы все основные положения частотного регулирования АД. В этих случаях и частотные законы регулирования для различного вида нагрузок будут одинаковы для обоих типов двигателей:  $U/f = \text{const}$  при постоянном моменте;  $U/\sqrt{f} = \text{const}$  при постоянной мощности;  $U/f^2 = \text{const}$  при вентиляторной нагрузке.

При частотном регулировании СД изменение тока возбуждения может производиться по выражению (10) только при опасности потери статической устойчивости в переходных режимах, например, при возмущениях по питающему напряжению сети или по нагрузке на валу. В установившихся режимах работы двигателя изменение тока возбуждения может использоваться для поддержания коэффициента мощности близким к единице или для формирования законов регулирования напряжения и частоты в соответствии с табл. 1.

*При подготовке статьи использованы результаты исследований, выполненных при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.*

### Литература

1. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. в 2 т. Т.2. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. –532 с.
2. Кабаргина О.В., Никулин О.В., Шабанов В.А. О законах частотного регулирования угловой скорости синхронных электродвигателей // Тинчуринские чтения: материалы докладов V Международной науч. конф. в 4 т. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. – Т.3. С. 63-64.
3. Шабанов В.А., Кабаргина О.В., Никулин О.В. Возможности частотного регулирования угловой скорости синхронных электродвигателей // Электронные устройства и системы: межвузовский сб. науч. тр. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2009. – С. 285-290.
4. Кабаргина О.В., Шабанов В.А., Юсупов Р.З. Выбег насосных агрегатов при наличии противодействия // Электротехнологии. Электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр./ II Всероссийской науч.-техн. конф. в 2 т. Т.1. – Уфа: изд-во УГНТУ, 2009. С. 10-17.
5. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. 3-е перераб. изд. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.
6. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.