

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И РЕЖИМА ПЕРЕКАЧКИ НА ВНУТРЕННИЙ УГОЛ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Шабанов В.А., Алексеев В.Ю.

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

В статье рассматривается процесс торможения синхронного двигателя при ступенчатом снижении частоты питающего напряжения и влияние режима работы нефтепровода на внутренний угол синхронных двигателей при частотном регулировании. Приведены расчеты значений внутреннего угла синхронного двигателя с учетом влияния противодействия в трубопроводе и коэффициента загрузки на примере двигателя СТД-8000

Ключевые слова: *синхронный двигатель, частотное регулирование, ступенчатое изменение частоты, магистральный насос, режим работы нефтепровода, внутренний угол*

Одним из наиболее перспективных способов регулирования режимов работы нефтепроводов является частотное регулирование скорости вращения магистральных насосов (МН). На нефтеперекачивающих станциях (НПС) для привода МН широко применяются синхронные двигатели (СД) серии СТД. При снижении частоты питающего напряжения СД переходят в режим торможения. При этом снижается скорость их вращения и изменяется внутренний угол (угол нагрузки) СД между вектором напряжения сети и вектором ЭДС, наведенной магнитным полем возбуждения в обмотке статора. Изменение скорости вращения СД на НПС и его внутреннего угла при снижении частоты питающего напряжения существенно зависит от режима работы нефтепровода. В работе рассматривается влияние режима перекачки на изменение внутреннего угла СД и при снижении частоты питающего напряжения при частотном регулировании и определяется максимально допустимое ступенчатое изменение частоты, при котором угол двигателя не превышает 180 °.

При рабочем режиме МН обратный клапан в обходной линии насоса закрыт динамическим давлением, развиваемым насосом [1]. Поэтому при снижении частоты питающего напряжения торможение СД происходит при закрытом обратном клапане. Это означает, что торможение насоса происходит в потоке жидкости, которая продолжает под действием других насосов технологического участка

трубопровода проходить через МН регулируемого насосного агрегата. Поток жидкости оказывает тормозящее действие на лопатки центробежного насоса. При снижении частоты вращения насоса развиваемый им напор снижается. При снижении частоты до некоторого значения обратный клапан в обвязке насоса открывается, и весь поток жидкости устремляется через открытый обратный клапан в обход насоса. При этом поток жидкости через насос прекращается, и торможение СД продолжается в режиме холостого хода.

Рассмотрим процесс торможения СД при ступенчатом снижении частоты питающего напряжения от начального f_0 до значения f_1 . В переходном режиме на двигатель действуют следующие моменты: знакопеременный синхронизирующий момент, обусловленный взаимодействием тока возбуждения с вращающимся магнитным полем; тормозной асинхронный момент и момент сопротивления на валу, обусловленный нагрузкой. При ступенчатом снижении частоты магнитное поле статора вращается несинхронно и проворачивается относительно ротора. При этом среднее значение знакопеременного синхронизирующего момента за один проворот будет равно нулю и его можно не учитывать. Асинхронная характеристика СД в зоне малых скольжений в процессе торможения также будет изменяться линейно. При линейном изменении тормозного момента его можно учесть изменением коэффициента нагрузки двигателя. С учетом изложенного при ступенчатом изменении частоты от начального f_0 до значения f_1 скольжение электродвигателя при закрытом обратном клапане в зоне малых скольжений можно представить в виде:

$$S = S_y \frac{t}{\tau_j''}, \quad (1)$$

где $S = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$; $S_y = (f_0 - f_1) / f_0$;

τ_j'' – приведенная постоянная времени насосного агрегата с учетом противодействия [2]:

$$\tau_j'' = \tau_j / (k_3 + m_{II}' + m_{A..CP}), \quad (2)$$

где k_3 – коэффициент нагрузки двигателя;

m_{II}' – приведенный момент сопротивления, обусловленный противодействием;

$m_{A..CP}$ – среднее значение асинхронного тормозного момента.

Уравнение (1) получено при замене реального графика изменения частоты вращения двигателя в процессе торможения линейным с той же постоянной времени. При этом из (1) для времени, за которое угловая частота СД снизится до значения $\omega_1 = 2\pi f_1$, получаем

$$t_1 = \tau_j. \quad (3)$$

Такая замена приводит к увеличению значений угла δ , но существенно упрощает анализ и делает его наглядным. Увеличение значений угла δ приведет к завышению допустимых изменений частоты питающего напряжения, что можно рассматривать как некоторый запас. Рассмотрим изменение угла δ_l за время t_l .

Угол нагрузки δ_l будет зависеть от двух составляющих. Первая обусловлена изменением скорости вращающегося магнитного поля на величину $\Delta\omega = 2 \cdot \pi \cdot \Delta f$ относительно скорости вращения ротора

$$\delta_{mn} = 2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot t \cdot 180/\pi = 360 \cdot \Delta f \cdot t. \quad (4)$$

Вторая составляющая обусловлена торможением ротора. Учитывая, что $s = d\delta/dt$, после интегрирования (1) получим для угла δ в градусах

$$\delta_m = \delta_0 + 180 \cdot \Delta f \cdot \frac{t^2}{\tau_j}, \quad (5)$$

где δ_0 определяется предшествующей нагрузкой.

С учетом (4) и (5) зависимость внутреннего угла нагрузки двигателя от времени принимает вид

$$\delta_l = \delta_0 - 360 \cdot \Delta f \cdot t + 180 \cdot \Delta f \cdot \frac{t^2}{\tau_j}. \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет определить, на какую величину изменится значение угла нагрузки по отношению к вектору напряжения частотой f_l при ступенчатом снижении частоты питающего напряжения от f_0 до f_l .

Постоянная времени СД определяется по выражению [3]:

$$\tau_j = J \frac{\pi^2 n^2}{900000 P_{НОМ}},$$

где J – момент инерции ротора, кг·м²;

$P_{НОМ}$ – номинальная мощность в киловаттах.

Для СД серии СТД с $n_0 = 3000$ об/мин

$$\tau_j = J \frac{98,63}{P_{НОМ}}. \quad (7)$$

Расчеты постоянной времени по (7) магистральных насосных агрегатов с СД серии СТД для мощностей, нашедших наиболее широкое применение на НПС, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Постоянные времени насосных агрегатов

Тип двигателя	СТД-2500	СТД-4000	СТД-5000	СТД-6300	СТД-8000
Значение τ_j , с	2,39	1,78	1,68	2,80	2,44

Особенностью СД серии СТД являются сравнительно небольшие значения кратности максимального момента K_M в синхронном режиме, которые изменяются от 1,61 до 1,81 (табл. 2).

Таблица 2

Значения угла нагрузки СД серии СТД

Тип СД	СТД-2500	СТД-4000	СТД-5000	СТД-6300	СТД-8000
Кратность максимального момента K_M в номинальном режиме					
$U_{НОМ} = 6$ кВ	1,81	1,65	1,65	1,63	1,61
$U_{НОМ} = 10$ кВ	1,71	1,72	1,65	1,63	1,61
Угол нагрузки в номинальном режиме $\delta_{НОМ}$, град.					
$U_{НОМ} = 6$ кВ	33,5	37,3	37,3	37,8	38,4
$U_{НОМ} = 10$ кВ	35,8	35,5	37,3	37,8	38,4
Угол нагрузки при номинальной нагрузке и $\cos \varphi = 1,0$, град.					
$U_{НОМ} = 6$ кВ	57,0	62,5	63,0	65,1	65,5
$U_{НОМ} = 10$ кВ	58,5	61,6	63,0	65,4	65,5

При этом СД серии СТД по сравнению с другими типами СД имеют повышенные значения углов нагрузки $\delta = \arcsin(1/K_M)$, которые для СД, применяющихся на НПС, изменяются от 33,5 ° до 38,4 ° [4]. Такие повышенные значения углов δ увеличивают опасность потери синхронизма при ступенчатом снижении частоты питающего напряжения. При частотном регулировании для снижения нагрузки на преобразователь частоты желательна работа СД с коэффициентом мощности, близким к единице. Это приведет к еще большим значениям углов наг-

рузки. Зависимость угла нагрузки СД от реактивной мощности описывается выражением (в относительных единицах) [5]:

$$\delta_0 = \arctan \frac{X_d \cdot K_3 \cdot P}{U^2 + X_d \cdot K_3 \cdot Q}, \quad (8)$$

где X_d – синхронное реактивное сопротивление СД;

K_3 – коэффициент загрузки,

P – активная мощность, потребляемая из сети в номинальном режиме;

$Q = P \cdot \operatorname{tg} \varphi$ – реактивная мощность;

U – напряжение на зажимах двигателя.

Расчеты значений угла нагрузки по выражению (8) при $\cos \varphi = 1,0$ (при $Q=0$) (табл. 2) показывают, что значения углов δ при полной загрузке и номинальном напряжении увеличиваются до значений 57,0-65,5 °. При снижении загрузки МН снижаются значения рабочих углов δ_0 в нормальном режиме и увеличиваются значения приведенных постоянных времени τ''_j по (2) при $m_A=0$ (табл. 2).

Таблица 3

Приведенные постоянные времени

Тип двигателя	СТД-2500	СТД-4000	СТД-5000	СТД-6300	СТД-8000
	Значение τ'_j при работе без противодействия, с				
$K_3 = 1,0$	2,39	1,78	1,68	2,80	2,44
$K_3 = 0,8$	2,99	2,22	2,1	3,50	3,05
	Значение τ''_j при работе с противодействием $m'_H = 1,0$				
$K_3 = 1,0$	1,20	0,89	0,84	1,40	1,22
$K_3 = 0,8$	1,33	0,99	0,93	1,56	1,52

Рассмотрим влияние противодействия и коэффициента загрузки МН на внутренний угол СД и на время снижения частоты вращения СД до нового синхронного значения на примере СТД-8000. Приведенная постоянная времени насосного агрегата в режимах с противодействием τ''_j меньше чем без противодействия. При этом угол поворота ротора может быть значительно больше, чем в режимах без противодействия.

Расчеты по выражениям (4) и (6) сведены в табл. 4 и представлены на рис. 1, 2. Значения начального угла нагрузки δ_0 приняты по табл. 2, значения приведенных постоянных времени – по табл. 3.

Таблица 4
Зависимость угла δ_l от времени (для режима без противодействия)

t, c	0	0,100	0,354	0,500	0,655	0,999	1,410	1,970	2,300	3,050
$\Delta f = 2 \text{ Гц}$	60	-10	-179	-270	-360	-541	-720	-900	-971	-1038
$\Delta f = 0,44 \text{ Гц}$	60	45	8	-12	-31	-71	-110	-149	-165	-179

На рис. 1 ротор двигателя проворачивается относительно магнитного поля статора и делает три оборота. При этом значение угла δ трижды проходит через значение 180° . При $\delta = 180^\circ$ ЭДС двигателя находится в противофазе с напряжением статора, что может привести к появлению в обмотке статора и в силовых элементах преобразователя частоты тока, в два раза превышающего значение пускового.

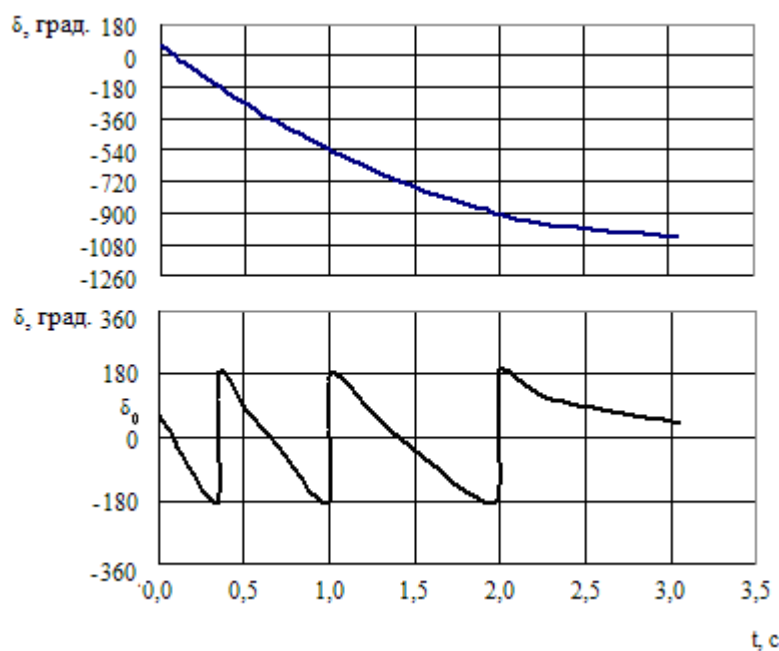


Рисунок 1. Зависимость угла δ_l от времени при $\Delta f = 2 \text{ Гц}$

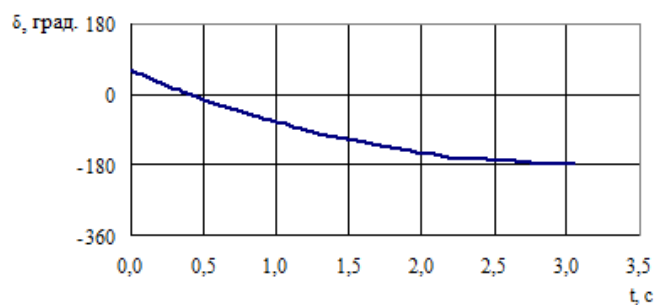


Рисунок 2. Зависимость угла δ_l от времени при $\Delta f = 0,44 \text{ Гц}$

Для исключения такого явления ступень изменения частоты должна быть ограничена значениями, при которых угол двигателя не достигает опасных значений. При снижении ступени регулирования частоты наибольшее значение угла δ уменьшается и при некотором граничном значении ступени регулирования $\Delta f_{гр}$, становится равным 180° . График изменения угла для этого случая показан на рис. 2. При снижении ступени регулирования ниже граничного значения наибольшее значения угла δ будет меньше 180° .

Таким образом, ступенчатое изменение частоты СД при частотном регулировании МН на НПС более, чем на $\Delta f_{гр}$, нежелательно.

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

Литература

1. Коршак А.А., Шаммазов А.М. Основы нефтегазового дела. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2005. – 528 с.
2. 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.
3. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. М.: Энергия. 1977. – 216 с.
4. Шабанов В.А., В.Ю. Алексеев В.А., Калимгулов А.Р., Хайртдинов И.А. Влияние тока возбуждения на устойчивость синхронных двигателей НПС // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. материалов / Всероссийской науч.-техн. конф. – Уфа: изд-во УГНТУ, 2007. – С. 93-98.
5. Сыромятников И.А. Режимы работы синхронных и асинхронных электродвигателей. М.: Госэнергоиздат, 1963. – 528 с.