



УДК 313.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАСКАДНО-ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТУРБОМЕХАНИЗМОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

THE USE OF THE CASCADE-FREQUENCY ELECTRIC TURBOMECHANICAL WITH THE AIM OF IMPROVING THEIR ENERGY EFFICIENCY

Шишлин Денис Иванович

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электропривода,
Липецкий государственный
технический университет
denis-shishlin@yandex.ru

Борзова Дарья Константиновна

магистрант кафедры электропривода,
Липецкий государственный
технический университет
borzovadarina@gmail.com

Чурсин Евгений Сергеевич

магистрант кафедры электропривода,
Липецкий государственный
технический университет
zhenia.chursin@yandex.ru

Аннотация. Данная статья посвящена перспективам применения системы каскадно-частотного электропривода для турбомеханизмов предприятий нефтегазовой отрасли для решения задач энергоэффективности и энергосбережения.

Ключевые слова: каскадно-частотный электропривод, асинхронный двигатель с фазным ротором, турбомеханизмы, энергоэффективность.

Shishlin Denis Ivanovich

Candidate of technical Sciences,
Associate Professor,
Senior lecturer of faculty of the electric drive,
Lipetsk State Technical University
denis-shishlin@yandex.ru

Borzova Daria Konstantinovna

Master's student of electric drive Department,
Lipetsk State Technical University
borzovadarina@gmail.com

Chursin Eugene Sergeevich

Master's student of electric drive Department,
Lipetsk State Technical University
zhenia.chursin@yandex.ru

Annotation. This article is devoted to the prospects of application of the cascade-frequency electric drive system for turbomechanisms of oil and gas industry enterprises for solving the problems of energy efficiency and energy saving.

Keywords: cascade-frequency electric drive, asynchronous motor with slip-ring rotor, Turbomachinery, energy efficiency.

Вопросы энергоэффективности являются актуальными для такого энергоемкого сектора промышленности нашей страны как топливно-энергетический комплекс. Регулируемые электроприводы механизмов нефтегазовой отрасли позволяют оптимизировать энергопотребление путем формирования законов управления, которые учитывают энергетические, технологические и иные факторы, влияющие на работу агрегатов (насосов различных типов, компрессоров, нагнетателей магистральных трубопроводов и др.).

Одним из путей направленных на повышение энергетических показателей турбомеханизмов является применение последовательного возбуждения асинхронного двигателя с фазным ротором, на основе которого построена система каскадно-частотного электропривода [1].

Регулирование параметров электропривода производится по цепи выпрямленного тока, что позволяет применять серийное оборудование аналогичное тому, которое используется для систем постоянного тока. Система регулирования включает в себя каналы управления напряжением выпрямителя [2] и частотой напряжения инвертора, питающего статор асинхронного двигателя, с применением корректирующих звеньев в цепях регуляторов, которые улучшают динамику электропривода [3]. Применение инверторов на базе высокочастотных вентиляей позволяет формировать напряжение на статоре двигателя практически синусоидальной формы. По каналу управления частотой можно формировать механические характеристики двигателя при «вентиляторном» характере нагрузки на валу, свойственном турбомеханизмам.

Частоту вращения рабочих органов турбомеханизмов чаще всего регулируют в соотношении 2 : 1 [4]. Система каскадно-частотного электропривода, сочетающая в себе свойства асинхронного вентиляейного каскада и частотного электропривода может работать в этом диапазоне.

Эксплуатационные свойства турбомеханизмов, например, шестеренных насосов, определяются Q-H-характеристикой, а также зависимостями механической мощности и КПД от подачи при постоянной скорости ω . На практике пользуются типовыми зависимостями $H = f(Q)$, $\eta = f(Q)$, $P = f(Q)$, которые



приводятся в каталогах насосов при номинальной скорости ω_H . При необходимости снижения подачи или напора регулируют скорость вращения рабочего колеса насоса вниз от номинального значения. Наиболее экономичным способом регулирования скорости турбомеханизмов является применение преобразователей частоты. При этом полезная мощность равна мощности развиваемой насосом.

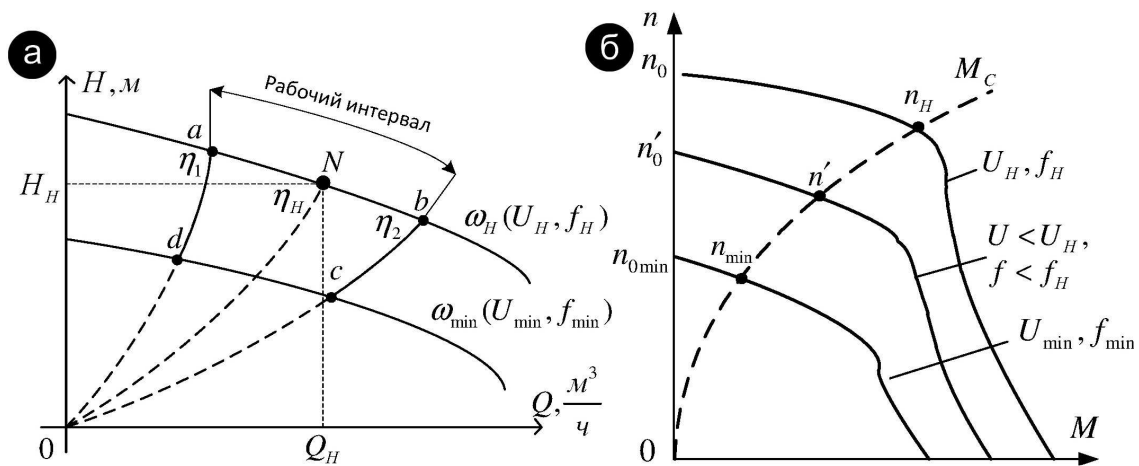


Рисунок 1 – Q-H-характеристики при номинальной и предельной скоростях – а; механические характеристики каскадно-частотного электропривода при работе на «вентиляторную» нагрузку – б

Q-H-характеристики для скоростей отличной от номинальной получают с помощью уравнений пропорциональности:

$$\frac{Q}{Q_H} = \frac{\omega}{\omega_H}, \quad \frac{H}{H_H} = \frac{\omega^2}{\omega_H^2}, \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{Q_1^2}{Q_2^2} = \text{const}. \tag{1}$$

Используя уравнения (1), а также диапазон нахождения рабочей точки насоса N на Q-H-характеристике из каталожных данных при номинальной скорости ω_H можно определить минимально допустимую скорость насоса ω_{\min} (рис. 1а). Нахождение этой скорости также позволяет определить величины напряжения, подводимого к обмотке статора асинхронного двигателя, и его частоты, что позволит оптимизировать энергопотребление насосной установки в периоды, когда требуется сократить подачу или напор рабочей жидкости в магистрали. Для этого следует воспользоваться зависимостями момента и мощности, выраженными соотношениями:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2}, \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{\omega_1^3}{\omega_2^3}. \tag{2}$$

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей, приводящих в действие турбомеханизмы и питающихся от вентиляльных преобразователей частоты проводится по закону изменения питающего напряжения и его частоты $\frac{U}{f^2} = \text{const}$. Момент нагрузки на валу турбомеханизма (момент статический) $M_c \sim \omega^2$. Рабочие участки механических характеристик асинхронных двигателей, особенно средней и большой мощности, можно принять практически линейными. Вентиляторный момент нагрузки M_c , совмещенный с механическими характеристиками асинхронного двигателя в системе каскадно-частотного электропривода при номинальных напряжении и частоте и при их пониженных значениях (рис. 1б), позволяет графически найти эти значения при номинальном КПД насоса η_H .

Принимаем, что кривая M_c отмечает на рабочих участках механических характеристик каскадно-частотного электропривода точки со скоростями n_H (на естественной характеристике) и n_{\min} (на искусственной (предельной) характеристике, построенной при пока неизвестных значениях напряжения U_{\min} и f_{\min}). Мощность, развиваемая двигателем при его работе на искусственной механической характеристике:

$$P_{\min} = P_H \frac{n_{\min}^3}{n_H^3}. \tag{3}$$

Разделив обе части данного выражения на ω_{\min} и с учетом перевода размерности скорости от рад/с к об./мин (указано в паспортных данных двигателя) по формуле $\omega = \frac{\pi n}{30}$, получаем формулу момента M_{\min} на валу двигателя:



$$M_{\min} = \frac{P_{\min}}{\omega_{\min}} = \frac{30}{\pi n_H^3} \cdot P_H \cdot n_{\min}^2 = \frac{30}{\pi n_H^3} \cdot \frac{Q_H H_H}{\eta_H} \cdot n_{\min}^2, \quad (4)$$

где значения напора H_H и расхода Q_H характеризуют рабочую точку при номинальном режиме работы насоса на Q-H-характеристике, приводимой в его паспортных данных.

Анализируя механические характеристики турбомеханизма и системы электропривода при номинальных и предельных параметрах, имеем:

$$\frac{M_H}{M_{\min}} = \frac{(n_0 - n_H)}{n_{0\min} - n_{\min}}, \quad (5)$$

где n_0 и $n_{0\min}$ – соответственно частоты вращения идеального холостого хода для номинальных и предельных напряжений и их частот. Из (5) следует:

$$n_{0\min} = (n_0 - n_H) \cdot \frac{M_{\min}}{M_H} + n_{\min} = (n_0 - n_H) \cdot \frac{n_{\min}^2}{n_H^2} + n_{\min} = \frac{60 f_{\min}}{p}, \quad (6)$$

где f_{\min} – предельная частота питающего напряжения U_{\min} , p – число пар полюсов асинхронного двигателя.

$$f_{\min} = \frac{p}{60} \cdot \left((n_0 - n_H) \cdot \frac{n_{\min}^2}{n_H^2} + n_{\min} \right). \quad (7)$$

Предельное значение напряжения:

$$U_{\min} = f_{\min}^2 \frac{U_H}{f_H^2} = \frac{U_H}{n_0^2} \cdot \left((n_0 - n_H) \cdot \frac{n_{\min}^2}{n_H^2} + n_{\min} \right)^2. \quad (8)$$

Таким образом, предельно допустимые значения напряжения и частоты преобразователя, при которых возможна безаварийная работа насосного агрегата, зависят только от каталожных данных двигателя и рассчитанной минимальной скорости вращения насоса при заданном значении кпд. Это при необходимости позволит планировать энергоэффективный режим работы насоса или группы насосов.

Одними из основных энергетических показателей электропривода являются кпд и коэффициент мощности.

Результаты аналитических расчетов, математического моделирования, экспериментальные исследования каскадно-частотного электропривода показали, что наличие регулируемого выпрямителя приводит к снижению потребления реактивной мощности на 25–30 % и повышению коэффициента мощности на 20 % работе на частотах вращения, близких к номинальной, что определяют ее преимущества перед системой асинхронно-вентильного каскада [5].

Литература:

1. Мещеряков В.Н., Шишлин Д.И., Ласточкин Д.В. Энергосберегающий каскадно-частотный электропривод для турбомеханизмов нефтегазовой отрасли // Булатовские чтения : II Международная научно-практическая конференция. – Краснодар, 2018. – Т. 6. – С. 218–220.
2. Мещеряков В.Н. Статистические характеристики системы асинхронного вентильного каскада с последовательным возбуждением / В.Н. Мещеряков [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 2. – С. 57–60.
3. Шишлин Д.И., Языкова Л.Н., Мантухов Е.С. Синтез регуляторов замкнутой системы управления каскадно-частотным электроприводом // Системы управления электротехническими объектами : сб. научных трудов восьмой Всероссийской научно-практической конференции. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2018. – Вып. 8. – 195 с.
4. Онищенко Г.Б., Автоматизированный электропривод промышленных установок / Г.Б. Онищенко [и др.]; под ред. Онищенко Г.Б. – М. : РАСХН, 2001. – 520 с.
5. Шишлин Д.И., Соловьев Р.С. Каскадно-частотный электропривод: особенности энергетики и определение энергетических показателей // Энергетика. Проблемы и перспективы развития : материалы IV Всероссийской молодежной научной конференции; отв. ред. Т.И. Чернышова. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019.

References:

1. Meshcheriakov V.N., Shishlin D.I., Lastochkin D.V. Energy saving cascade frequency electric drive for oil and gas industry turbomechanisms // Bulatovskie readings : II International scientific and practical conference. – Krasnodar, 2018. – Vol. 6 – P. 218–220.



2. Meshcheriakov V.N. Static characteristics of the asynchronous valve cascade system with the sequential excitation / V.N. Meshcheriakov [et al.] // *Izvestia vuzov. Electromechanics.* – 2009. – № 2. – P. 57–60.
3. Shishlin D.I., Yazykova L.N., Mantukhov E.S. Synthesis of the closed-loop control system regulators of the cascade-frequency electric drive // *Electrical objects control systems: a collection of scientific papers of the Eighth All-Russian scientific-practical conference.* – Tula : Tula State University, 2018. – Issue. 8. – 195 p.
4. Onishchenko, G.B.; *Automated electric drive of the industrial installations* / G.B. Onishchenko [et al.]; under edition of Onishchenko G.B. – M. : RAAS, 2001. – 520 p.
5. Shishlin D.I., Soloviev R.S. Cascade-frequency electric drive: features of the power engineering and determination of the energy parameters // *Energetika. Problems and prospects of development: materials of the IV All-Russian Youth Scientific Conference; edited by T.I. Chernyshova.* – Tambov : Publishing Center of FSBEI TSTU, 2019.