

УДК 621.313

РЕЖИМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ УСТАНОВОК ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Лысенко Олег Александрович,

канд. техн. наук, доцент каф. «Электрическая техника» ФГБОУ ВПО
«Омский государственный технический университет»,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11. E-mail: deolas@mail.ru

Актуальность работы: Возрастающие технологические требования к качеству производственных процессов, связанных с перекачкой невязких жидкостей, указывают на необходимость улучшения режимов работы установок перекачки жидкости с центробежными насосами, в том числе и с помощью математического моделирования. Установки центробежных насосов, как правило, моделируются с помощью обобщенных интегральных характеристик, не позволяющих исследовать поведение системы в динамических режимах работы. В то время как именно рассмотрение динамических моделей установок центробежных насосов, входящих в состав электротехнических комплексов, позволяет реализовать наиболее эффективные режимы работы, как с точки зрения энергосбережения, так и надежности. Станции перекачки жидкости, в силу технологических процессов, обладают одним из самых высоких потенциалов применения энерго- и ресурсосберегающих технологий, что согласно Указу президента РФ от 4 июня 2008 года № 889, Федеральному Закону РФ № 261 и Энергетической стратегии России на период до 2030 года представляет одно из направлений развития страны, выявляет актуальность данной темы.

Цель работы: Выявить законы частотного управления установок центробежных насосов, при которых достигается минимум потерь в силовом канале преобразования энергии, разработать методику построения вольт-частотных характеристик.

Методы исследования: методы частотного электропривода и электрических машин, методы операционного исчисления, теории численных методов решения нелинейных систем дифференциальных уравнений, методы теории гидравлики, теории центробежных лопастных машин. Использовались следующее прикладное программное обеспечение Maple, MatLab/Simulink.

Результаты: Исследованы с помощью численных экспериментов характеристики установок центробежных насосов. Разработана методика построения регулировочных вольт-частотных характеристик при скалярном частотном управлении асинхронного электродвигателя, в зависимости от режимов работы внешней гидросети центробежного насоса.

Ключевые слова:

Энергосбережение, асинхронный двигатель, насос.

Энергосбережение является одним из приоритетов государственной политики, в связи с чем руководством страны был разработан пакет нормативных документов в сфере энергосбережения и повышения энергетической эффективности [1].

Электроприводы с вентиляторной нагрузкой, к которой относятся центробежные насосы для перекачки воды и других жидкостей, потребляют до 25 % [2] всей вырабатываемой электроэнергии. В силу особенностей технологического процесса данные электроприводы имеют значительный потенциал энергосбережения. Работа этих систем отличается неравномерным потреблением жидкости, тепловой энергии в зависимости от погодных условий, времени года и суток [3, 4].

Из соображений энергоэффективности, объективно подтверждается необходимость перехода от систем дроссельного регулирования насосных агрегатов к системам автоматического управления ими, путем автоматического поддержания необходимого технологического параметра, в частности напора при изменяющемся расходе воды за счет применения частотно-регулируемых асинхронных электроприводов [5–7].

Одной из целей энергоэффективности (оптимизации) частотно-регулируемых электроприводов является достижение минимального экстремума функции потерь мощности [8–10]. Основными элементами силового канала установки центробеж-

ных насосов (УЦН) является асинхронный двигатель (АД) и центробежный насос (ЦН), составляющие систему АД–ЦН. Задача оптимизации в системе асинхронный двигатель – центробежный насос заключается в том, чтобы при заданном расходе ЦН и заданной скорости ротора определить такие значения частоты и амплитуды напряжения, при которых обеспечивается минимум потерь в двигателе. Так как при фиксированных моменте сопротивления и скорости механическая мощность не изменяется, то минимум потерь соответствует минимуму потребляемой мощности и максимуму КПД двигателя. Получение аналитического выражения для амплитуды и частоты напряжения затруднено из-за сложности системы уравнений электромеханической системы: центробежный насос – асинхронный двигатель [11, 12]. Поэтому приведем результаты численного решения.

Для описания процессов в асинхронном двигателе используется модель асинхронного двигателя с двухконтурным ротором. Применение моделей асинхронного двигателя с двухконтурной схемой замещения ротора позволяет учитывать явления насыщения и эффект вытеснения токов. Система уравнений для описания асинхронной машины с короткозамкнутым двухконтурным ротором в единой системе координат, вращающейся со скоростью ω_0 , будет иметь вид [13–15]:

$$\begin{cases}
u_{Sx} = R_S \left(\frac{k_{iS}}{R_S} p + 1 \right) i_{Sx} + \\
+ k_{R2} p \psi_{R1x} + k_{R1} p \psi_{R2x} - \\
- \omega_0 k_{iS} i_{Sy} - k_{R2} \omega_0 \psi_{R1y} - k_{R1} \omega_0 \psi_{R2y}; \\
u_{Sy} = R_S \left(\frac{k_{iS}}{R_S} p + 1 \right) i_{Sy} + k_{R2} p \psi_{R1y} + k_{R1} p \psi_{R2y} + \\
+ \omega_0 k_{iS} i_{Sx} + k_{R2} \omega_0 \psi_{R1x} + k_{R1} \omega_0 \psi_{R2x}; \\
0 = -k_{R2} R_{R1} i_{Sx} + \frac{1}{T_{R1}} (T_{R1} p + 1) \psi_{R1x} - \\
- \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \psi_{R2x} - (\omega_0 - p_{\Pi} \omega_m) \psi_{R1y}; \\
0 = -k_{R2} R_{R1} i_{Sy} + \frac{1}{T_{R1}} (T_{R1} p + 1) \psi_{R1y} - \\
- \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \psi_{R2y} + (\omega_0 - p_{\Pi} \omega_m) \psi_{R1x}; \\
0 = -k_{R1} R_{R2} i_{Sx} + \frac{1}{T_{R2}} (T_{R2} p + 1) \psi_{R2x} - \\
- \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \psi_{R1x} - (\omega_0 - p_{\Pi} \omega_m) \psi_{R2y}; \\
0 = -k_{R1} R_{R2} i_{Sy} + \frac{1}{T_{R2}} (T_{R2} p + 1) \psi_{R2y} - \\
- \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \psi_{R1y} + (\omega_0 - p_{\Pi} \omega_m) \psi_{R2x}; \\
M = \frac{3}{2} p_{\Pi} k_{R2} (\psi_{R1x} i_{Sy} - \psi_{R1y} i_{Sx}) + \\
+ \frac{3}{2} p_{\Pi} k_{R1} (\psi_{R2x} i_{Sy} - \psi_{R2y} i_{Sx}); \\
\omega_m = \frac{M - M_{\Pi}}{Jp},
\end{cases} \quad (1)$$

где

$$\vec{u}_S = u_{Sx} + j u_{Sy}, \quad \vec{i}_S = i_{Sx} + j i_{Sy},$$

$$\vec{\psi}_{R1} = \psi_{R1x} + j \psi_{R1y}, \quad \vec{\psi}_{R2} = \psi_{R2x} + j \psi_{R2y}$$

– напряжение, ток статора и потокоцепления ротора соответственно;

$$k_{R1} = \frac{L_{R1} L_m - L_m^2}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}, \quad k_{R2} = \frac{L_{R2} L_m - L_m^2}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}, \quad \sigma = L_{R1} L_{R2} - L_m^2,$$

$$T_{R1} = \frac{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}{R_{R1} L_{R2}}, \quad T_{R2} = \frac{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}{R_{R2} L_{R1}},$$

$$k_{iS} = \frac{L_S L_{R1} L_{R2} - L_S L_m^2 - L_{R1} L_m^2 - L_{R2} L_m^2 + 2 L_m^3}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}$$

– безразмерные коэффициенты; L_S , L_{R1} , L_{R2} , L_m – индуктивности статора, ротора и взаимоиндуктивность между статором и ротором соответственно; R_S , R_{R1} , R_{R2} – активное сопротивление статора и ротора; J – момент инерции на валу двигателя, учитывающий инерционность двигателя и центробежного насоса; ω_m , ω_0 – частота вращения ротора и ча-

стота вращения поля статора; M – развиваемый двигателем момент; M_{Π} – момент сопротивления центробежного насоса.

Входными внешними воздействиями на асинхронный двигатель, согласно (1), будут проекции вектора напряжения $\vec{u}_S$ статора: u_{Sx} и u_{Sy} , частота вращения статора ($\omega_0 = 2\pi f$), а также момент нагрузки M_{Π} .

В качестве гидравлической подсистемы используется модель, полученная на основе метода электрогидравлических аналогий [16–18], – схема замещения (рис. 2) с параметрами:

$H_{cm} \sin(\omega_m t)$ – противоЭДС статического напора; $L_{\mu Q}$ – индуктивность, которая характеризует изменение расхода жидкости в зависимости от количества лопастей; $L_{\mu H}$ – индуктивность, которая характеризует изменение напора жидкости в зависимости от количества лопастей; $R_{\Delta Q}$ – активное сопротивление, учитывающее объемные потери; $L_{\Delta Q}$ – индуктивность, учитывающая объемные потери; $R_{\Delta H}$ – активное сопротивление, учитывающее потери напора в отводе; $L_{\Delta H}$ – индуктивность, учитывающая потери напора в отводе.

Для схемы на рис. 1 в операторной форме можно записать:

$$\begin{cases}
k_{\omega}^2 h_{0d} = R_{\text{мех}} k_{\omega} q_{\text{мехd}} + L_{\text{мех}} p k_{\omega} q_{\text{мехd}} - \omega_m L_{\text{мех}} k_{\omega} q_{\text{мехq}}; \\
k_{\omega}^2 h_{0q} = R_{\text{мех}} k_{\omega} q_{\text{мехq}} + L_{\text{мех}} p k_{\omega} q_{\text{мехq}} + \omega_m L_{\text{мех}} k_{\omega} q_{\text{мехd}}; \\
k_{\omega}^2 h_{0d} = L_{\mu H} p k_{\omega} q_{\Delta d} - \omega_m L_{\mu H} k_{\omega} q_{\Delta q} + \\
+ L_{\mu Q} k_{\omega} q_{\mu d} - \omega_m L_{\mu Q} k_{\omega} q_{\mu q}; \\
k_{\omega}^2 h_{0q} = L_{\mu H} p k_{\omega} q_{\Delta q} + \omega_m L_{\mu H} k_{\omega} q_{\Delta d} + \\
+ L_{\mu Q} p k_{\omega} q_{\mu q} + \omega_m L_{\mu Q} k_{\omega} q_{\mu d}; \\
L_{\mu Q} p k_{\omega} q_{\mu d} - \omega_m L_{\mu Q} k_{\omega} q_{\mu q} = \\
= R_{\Delta q} k_{\omega} q_{\Delta d} + L_{\Delta q} p k_{\omega} q_{\Delta d} - \omega_m L_{\Delta q} k_{\omega} q_{\Delta q}; \\
L_{\mu Q} p k_{\omega} q_{\mu q} + \omega_m L_{\mu Q} k_{\omega} q_{\mu d} = \\
= R_{\Delta q} k_{\omega} q_{\Delta q} + L_{\Delta q} p k_{\omega} q_{\Delta q} + \omega_m L_{\Delta q} k_{\omega} q_{\Delta d}; \\
L_{\mu Q} p k_{\omega} q_{\mu d} - \omega_m L_{\mu Q} k_{\omega} q_{\mu q} = (R_{\Delta H} + R_{\Gamma}) k_{\omega} q_{\Delta d} + \\
+ L_{\Delta H} p k_{\omega} q_{\Delta d} - \omega_m L_{\Delta H} k_{\omega} q_{\Delta q} + H_{\text{CTd}}; \\
L_{\mu Q} p k_{\omega} q_{\mu q} + \omega_m L_{\mu Q} k_{\omega} q_{\mu d} = (R_{\Delta H} + R_{\Gamma}) k_{\omega} q_{\Delta q} + \\
+ L_{\Delta H} p k_{\omega} q_{\Delta q} + \omega_m L_{\Delta H} k_{\omega} q_{\Delta d} + H_{\text{CTq}}; \\
q_{\Sigma d} = q_{\text{мехd}} + q_{\Delta d}; \\
q_{\Sigma q} = q_{\text{мехq}} + q_{\Delta q}; \\
q_{\Delta d} = q_{\mu d} + q_{\Delta d} + q_{\text{Hd}}; \\
q_{\Delta q} = q_{\mu q} + q_{\Delta q} + q_{\text{Hq}}.
\end{cases} \quad (2)$$

Входными внешними воздействиями на центробежный насос, согласно (2), будут проекции вектора напора холостого хода $h_{0\alpha}$ и $h_{0\alpha\beta}$, частота вращения ротора АД (частота вращения рабочего колеса) ω_m , а также сопротивление нагрузки гидравлической магистрали R_{Γ} .

Уравнение связи между двигателем и насосом записывается исходя из равенства механических

мощностей – потребляемой насосом и вырабатываемой двигателем:

$$M_H \omega_m = k_\omega^3 q_\Sigma h_0, \quad (3)$$

где $k_\omega q_\Sigma = \sqrt{(k_\omega q_{\Sigma\alpha})^2 + (k_\omega q_{\Sigma\beta})^2}$, $h_0 = \sqrt{h_{0\alpha}^2 + h_{0\beta}^2}$,

$k_\omega = \frac{\omega_m}{\omega_{\text{ЦНном}}}$, $\omega_{\text{ЦНном}}$ – номинальная скорость вращения рабочего колеса центробежного насоса.

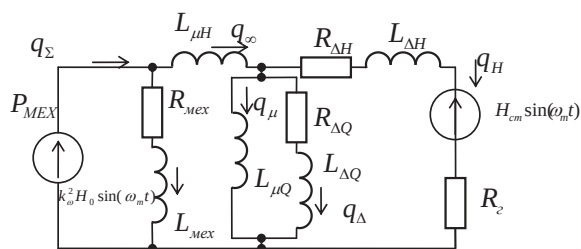


Рис. 1. Модель ЦН на основе электрогидравлических аналогий

Fig. 1. Model of a centrifugal pump based on electrohydraulic analogies

Совместно рассматривая уравнения (1)–(3), получим динамическую модель для комплекса асинхронный двигатель – центробежный насос.

Алгоритм оптимизации потерь мощности двигателя, с помощью модели, представленной уравнениями (1)–(3), выглядит следующим образом:

- 1) задается расход насоса q_H (путем изменения R_2) и угловая скорость ω_m ;
- 2) задается действующее значение напряжения U , приложенное к двигателю;
- 3) численно находится такая скорость ω_0 , которая при расчете действительного расхода q дает результат $q=q_H$;

4) рассчитываются суммарные потери мощности в двигателе, и строится зависимость потерь мощности от напряжения (рис. 2);

5) в процессе расчета определяется точка с минимумом потерь мощности, строится вольт-частотная регулировочная характеристика (рис. 3, зависимость а).

Таким образом, задача сводится к отысканию минимума функции потерь мощности двигателя, т. е. $\Delta P(U, f, R_2, H_{\text{ст}}) \rightarrow \min$.

Если проанализировать полученные результаты (рис. 3, зависимость а), то можно сказать, что полученная характеристика аппроксимируется до составной кривой, состоящей из квадратичной зависимости с некоторым коэффициентом и линейного участка прямой (рис. 3, зависимость б). Данный факт говорит о необходимости уточнения квадратичной зависимости регулировочной характеристики, используемой для электроприводов с вентиляторной механической характеристикой [12].

Однако полученный результат будет соответствовать только одному режиму с определенным сопротивлением напорной магистрали ($Q=Q_{\text{ном}}$, при $\omega_m=\omega_{\text{ном}}$). Как известно, центробежный насос имеет множество режимов работы, ограниченных рекомендованными значениями сопротивлений напорной магистрали, где конкретное значение напора определяется пересечением напорной характеристики насоса, соответствующей выбранной скорости ω_m , и характеристикой трубопровода. Различными сопротивлениям напорной магистрали будут отвечать различные механические характеристики сопротивления ЦН (рис. 4).

По предложенной методике можно также определить регулировочные характеристики (рис. 5) для семейства кривых характеристик трубопрово-

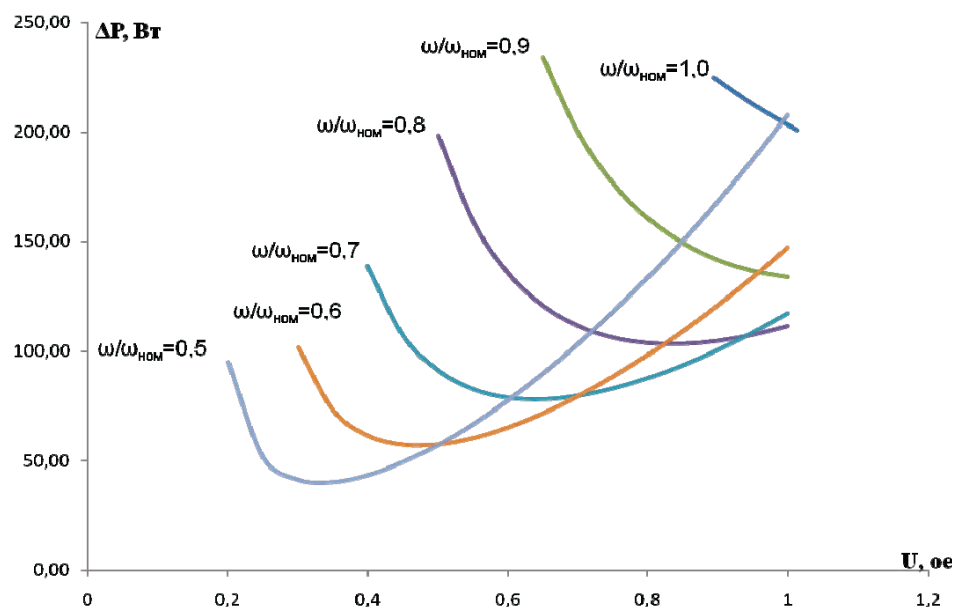


Рис. 2. Зависимость потерь ΔP в АД типа А80А2УЗ от напряжения ($P=1,5$ кВт) при разных скоростях

Fig. 2. Dependence of ΔP losses in asynchronous motor (AM) of A80A2Y3 type ($P=1,5$ kWt) at different rates

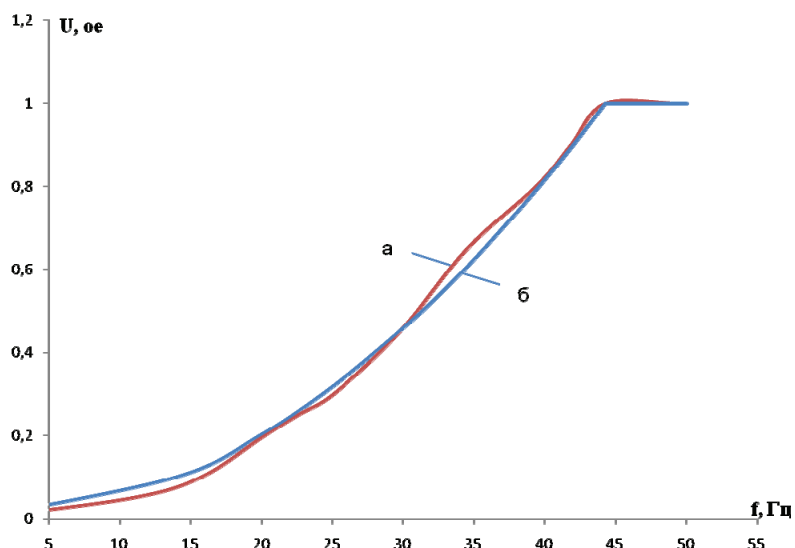


Рис. 3. Регулировочные характеристики: а) точная; б) аппроксимированная

Fig. 3. Regulation curves: a) neat; б) approximate

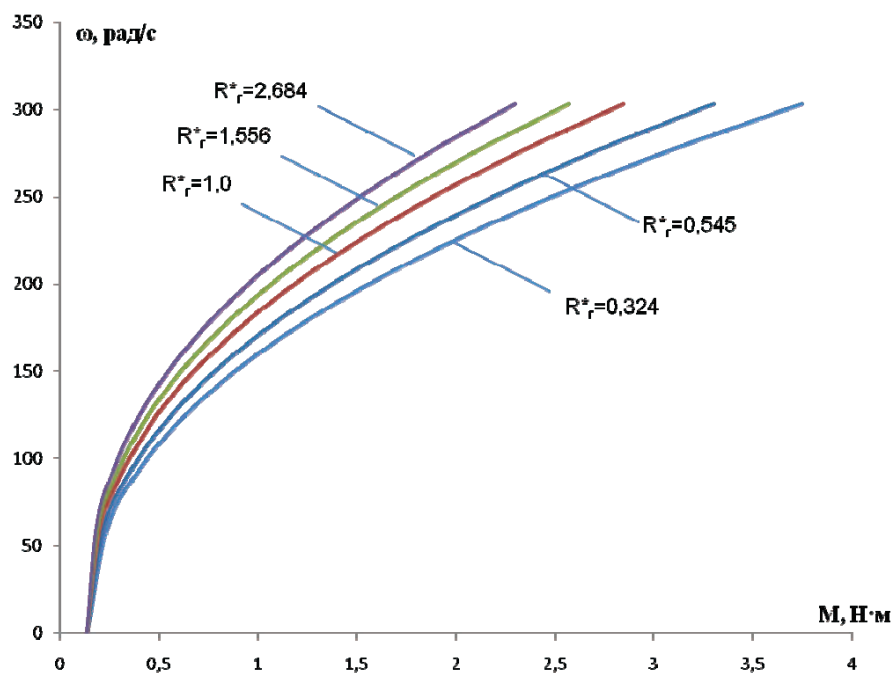


Рис. 4. Зависимости момента сопротивления ЦН при различных сопротивлениях напорной магистрали

Fig. 4. Dependence of centrifugal pump (CP) resistance moment at different resistances of pressure main

да (рис. 5). На рис. 4 более пологий вид имеют регулировочные характеристики, имеющие меньшее гидравлическое сопротивление. Кроме того, для соответствующих регулировочных характеристик с помощью уравнений (1)–(3) строится зависимость напора от частоты (рис. 6).

Таким образом, зная сопротивление напорной магистрали и используя данную методику для построения регулировочных характеристик, можно получить наиболее экономичный режим работы установки центробежного насоса.

Полученные регулировочные характеристики определены для случая работы насоса на сеть без противодействия, однако в большинстве случаев насос или насосная станция работает на гидросеть, обладающую статическим давлением. Вышеописанная методика, а также модель ЦН, работающего на сеть с противодействием, позволяет получить соответствующие регулировочные характеристики для каждого режима. Так как центробежный насос может работать на трубопровод с характеристиками, у которых статический напор изменяется в широких

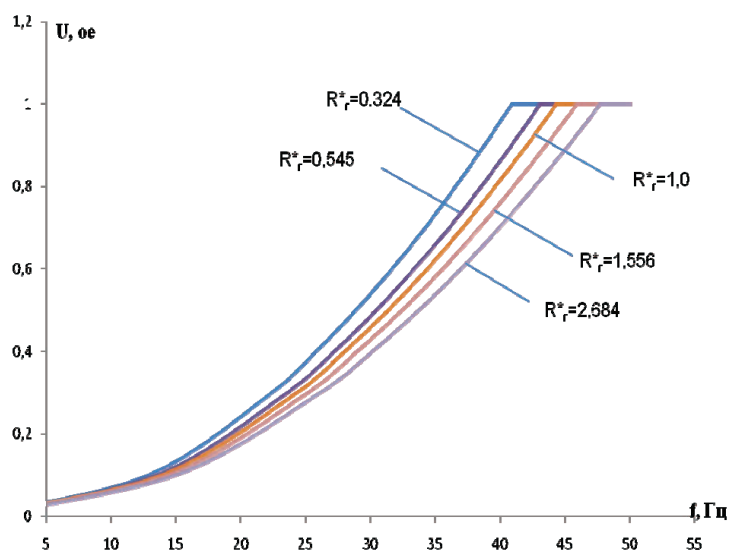


Рис. 5. Регулировочные характеристики при различных сопротивлениях напорной магистрали

Fig. 5. Regulation curves at different resistances of pressure main

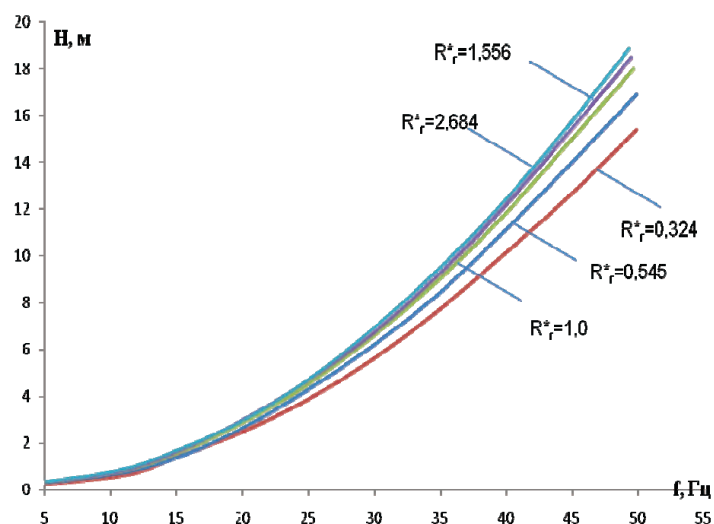


Рис. 6. Регулировочные характеристики напора при различных сопротивлениях напорной магистрали

Fig. 6. Pressure regulation curves at different resistances of pressure main

диапазонах (от 0 до $0,75H_{ном}$), то регулировочные характеристики необходимо получить во всем этом диапазоне. Как видно на рис. 7, с увеличением статической составляющей сопротивления насосной магистрали увеличивается показатель степени механической характеристики (уменьшается наклон кривой), а кроме того, уменьшается диапазон регулирования.

Регулировочная характеристика при этом будет иметь вид (4)

$$f = \left(\frac{U^*}{k_{Uf}} \right)^{\frac{1}{a_{Uf}}}, \quad (4)$$

где $U^* = U/U_{ном}$ — относительное значение напряжения; k_{Uf} — коэффициент аппроксимированной вольт-частотной характеристики; a_{Uf} — показатель степени аппроксимированной вольт-частотной характеристики.

Для того чтобы определить k_{Uf} и a_{Uf} , необходимо для различных статических составляющих сопротивления магистрали в границах рабочего участка ЦН определить соответствующие вольт-частотные характеристики и аппроксимированные кривые, соответствующие этим характеристикам, представляющие собой степенную функцию (4). Для каждого значения статического напора по предложенной выше методике оптимизации потерь в асинхронном двигателе с использованием уравнений (1)–(3) получим регулировочные характеристики частотного управления асинхронным двигателем. Семейство регулировочных характеристик для конкретного значения $H_{ст}^*$ будет соответствовать определенному значению R_r , т. е. определенной подаче насосной установки, что определяет момент нагрузки для двигателя.

Анализ показывает, что коэффициент аппроксимированной вольт-частотной характеристики k_{Uf}

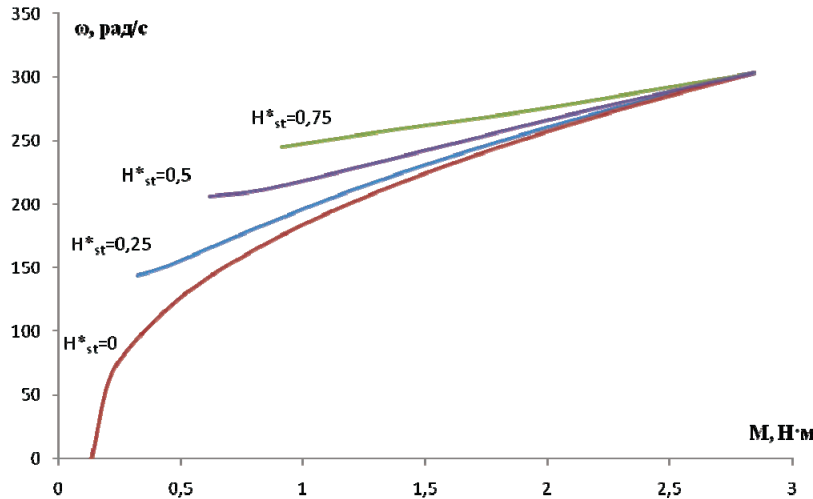


Рис. 7. Механические характеристики ЦН при различном противодействии

Fig. 7. CP mechanical characteristics at different resistance

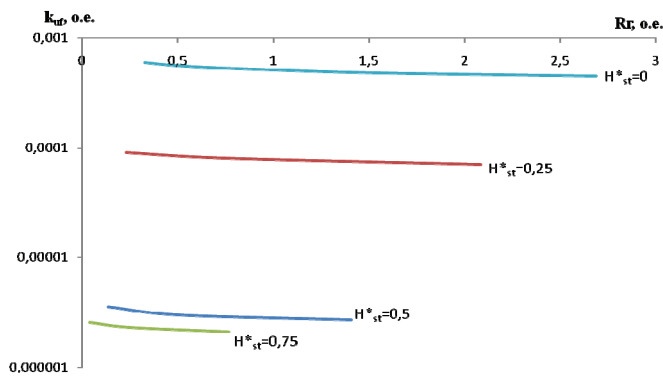


Рис. 8. Зависимость коэффициента аппроксимированной вольт-частотной характеристики

Fig. 8. Dependence of coefficient of approximated volt-frequency characteristic

зависит от динамической (R_r) и статической (H_{st}^*) составляющих полного гидравлического сопротивления (рис. 8).

В то же время показатель степени аппроксимированной вольт-частотной характеристики a_{uf} зависит от статической составляющей гидравлического сопротивления (H_{st}^*) (рис. 9). Используя полученные графические зависимости, а также зная параметры трубопровода, можно определить k_{uf} и a_{uf} , тем самым построив регулировочную характеристику, соответствующую режиму работы насосной установки, с точки зрения энергоэффективности.

Как видно из рис. 5, регулировочная характеристика является составной, т. е. состоящей из кривой, соответствующей степенной функции (4), и отрезка прямой $U^*=1$. Место их пересечения определяется граничной частотой $f_{гр}$ (5), которая определяется как:

$$f_{гр} = \left(\frac{1}{k_{uf}} \right)^{\frac{1}{a_{uf}}} \quad (5)$$

Тогда общее уравнение для регулировочной характеристики (6) можно записать как:

$$\begin{cases} f = \left(\frac{U^*}{k_{uf}} \right)^{\frac{1}{a_{uf}}}, & f < f_{гр}; \\ U^* = 1, & f \geq f_{гр}. \end{cases} \quad (6)$$

Энергетическая эффективность регулируемого привода обеспечивается главным образом тем, что с его помощью поддерживается более выгодный с энергетической точки зрения технологический процесс перекачки жидкости насосными установками. Необходимый режим работы насосных установок создается с помощью соответствующих систем управления, однако алгоритм и законы по которым осуществляется регулирование, могут быть самыми разными [19, 20].

Выводы

Представленная математическая модель УЦН в целом позволяет исследовать переходные процессы УЦН, такие как пуск/останов двигателя, сброс/наброс гидравлической нагрузки, и анализировать энергетические характеристики силового канала в установившихся режимах работы.

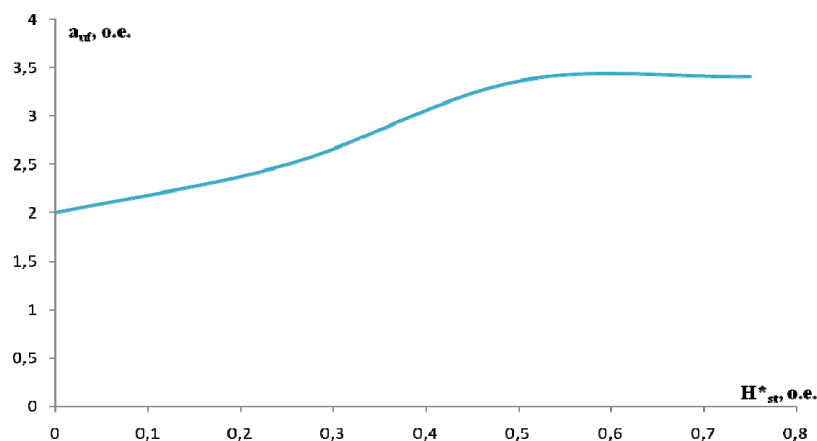


Рис. 9. Зависимость показателя степени аппроксимированной вольт-частотной характеристики

Fig. 9. Dependence of index of approximated volt-frequency characteristic degree

Разработанная методика позволяет избежать относительно сложных аналитических способов получения регулировочных вольт-частотных ха-

рактеристик, при скалярном частотном управлении, для асинхронного электропривода центробежных насосов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ефремов В.В., Маркман Г.З. «Энергосбережение» и «энергоэффективность»: уточнение понятий, система сбалансированных показателей «энергоэффективности» // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 146–148.
- Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках. – М.: ИК «ЯГОРБА» – Биоинформсервис, 1998. – 180 с.
- Толпаров Д.В., Дементьев Ю.Н. Анализ систем управления насосных станций // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 113–118.
- Бейерлейн Е.В. Обоснование применения энергосберегающей схемы испытаний крупных асинхронных электродвигателей // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 69–73.
- Power maximization of an asynchronous wind turbine with a variable speed feeding a centrifugal pump / T. Ouchbel, S. Zouggar, M.L. Elhafyani, M. Seddik, M. Oukili, A. Aziz, F.Z. Kadda // Energy Conversion and Management. – 2014. – V. 78. – P. 976–984.
- Belgacem B.Gh. Performance of submersible PV water pumping systems in Tunisia // Energy for Sustainable Development. – 2012. – V. 16. – Iss. 4. – P. 415–420.
- Аристов А.В. Электропривод колебательного движения с регулируемой нейтрально положения // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 128–131.
- Дементьев Ю.Н. Оптимальное управление вентильным преобразователем в электроприводах переменного тока // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 138–142.
- Oguz Y., Dede M. Speed estimation of vector controlled squirrel cage asynchronous motor with artificial neural networks // Energy Conversion and Management. – 2011, January. – V. 52. – Iss. 1. – P. 675–686.
- Семькина Ю.И., Завьялов В.М., Глазко М.А. Градиентное управление многодвигательным асинхронным электроприводом // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 65–69.
- Лысенко О.А., Дегтярев А.В., Хамитов Р.Н. Моделирование электротехнического комплекса в системе «асинхронный двигатель – центробежный насос» // Известия Транссиба. – 2013. – № 3 (15). – С. 30–35.
- Тютеева П.В. Алгоритм оценки эффективности работы асинхронных двигателей в насосных агрегатах // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 74–79.
- Федоренко А.А., Лазовский Э.Н., Печатнов М.А. Уравнения динамики асинхронной машины, инвариантные к скорости вращения системы координат // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 142–146.
- Ряхина Е.Ю., Ковалев Ю.З., Лысенко О.А. Условия физической реализуемости математических моделей асинхронных двигателей // Промышленная энергетика. – 2012. – № 1. – С. 47–50.
- An investigation of the dynamic electromechanical coupling effects in machine drive systems driven by asynchronous motors / T. Szolc, R. Konowrocki, M. Michajlow, A. Pręgoska // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2014. – V. 49. – P. 118–134.
- Костышин В.С. Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии: дис. ... д-ра. техн. наук. – Ивано-Франковск, 2000. – 115 с.
- Татевосян А.А. Синтез многоконтурной схемы замещения эластомеров // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 3. – С. 24–30.
- Использование электрогидравлической технологии для создания буронабивных свай / Н.Т. Зиновьев и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 173–176.
- Система управления центробежным насосом: пат. 2511934 Российская Федерация, МПК F04D15/00, F04D13/06. № 2012139730/06, заявл. 17.09.12; опубл. 10.04.14, Бюл. № 10. – 5 с.
- Лысенко О.А., Хамитов Р.Н. Система стабилизации напора установок центробежных насосов со скалярным управлением частоты вращения асинхронного двигателя // Известия Транссиба. – 2013. – № 4 (16). – С. 25–30.

Поступила 20.05.2014 г.

ENERGY SAVING MODES OF CENTRIFUGAL PUMPS INSTALLATIONS WITH ASYNCHRONOUS ENGINES

Oleg A. Lysenko,

Cand. Sc., Omsk State Technical University, 11, Mira Avenue,
Omsk, 644050, Russia. E-mail: deolas@mail.ru

Relevance of the research. Increasing technological requirements to the quality of production processes associated with non-viscous liquid pumping indicate the need to improve the operating conditions of liquid transfer systems with centrifugal pumps, including the improvement with the help of mathematical modeling. Installations of centrifugal pumps are modeled as a rule using the generalized integral characteristics which do not allow studying the behavior of the system under dynamic operating conditions. While, this consideration of dynamic models of centrifugal pump units included in the electrical systems allows realizing the most efficient modes of operation, both in terms of energy efficiency and reliability.

Fluid pumping stations, due to technological processes have one of the highest potential of applying energy-saving technologies that is one of the areas of the country development and it reveals the relevance of the topic according to the presidential decree of June 4, 2008 № 889, the Federal Law of the Russian Federation № 261, and the Energy Strategy of Russia for the period up to 2030.

The main aim of the study is to determine the frequency steering laws of centrifugal pump installations at which the minimum losses in the power conversion channel occur and to develop the methodology for constructing voltage-frequency characteristics.

The methods used in the study: frequency electric drive and electric machines methods, methods of operational calculus, the theory of numerical methods for solving nonlinear systems of differential equations, methods of the theory of hydraulics, theory centrifugal machines. The authors used Maple, MatLab / Simulink.

The results. The author investigated characteristics of centrifugal pump installations by means of numerical experiments, developed the technique of constructing the adjustment of voltage-frequency characteristics with scalar frequency control of asynchronous motor depending on operation modes of external drainage system.

Key words:

Energy efficiency, asynchronous motor, pump.

REFERENCES

1. Efremov V.V., Markman G.Z. «Energoberezhenie» i «Energoeffektivnost»: utochnenie ponyaty, sistema sbalansirovannykh pokazateley «energoeffektivnosti» [«Energy saving» and «energy efficiency»: specification of concepts, system of the balanced indicators of «energy efficiency»]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 4, pp. 146–148.
2. Leznov B.S. *Energoberezhenie i reguliruemyy privod v nasosnykh ustanovkakh* [Energy saving and adjustable drive in pump applications]. Moscow, YaGORBA – Bioinformservis, 1998. 180 pp.
3. Tolparov D.V., Dementev Yu.N. Analiz sistem upravleniya nasosnykh stantsiy [Analysis of control systems of pump stations]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 4, pp. 113–118.
4. Beyerleyn E.V. Obosnovanie primeneniya energosberegayushchey skhemy ispytany krupnykh asinkhronnykh elektrodvigatelay [Justification of application of energy saving scheme in testing large asynchronous electric motors]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 4, pp. 69–73.
5. Ouchbel T., Zouggar S., Elhafyani M.L., Seddik M., Oukili M., Aziz A., Kadda F.Z. Power maximization of an asynchronous wind turbine with a variable speed feeding a centrifugal pump. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 78, pp. 976–984.
6. Belgacem B.Gh. Performance of submersible PV water pumping systems in Tunisia. *Energy for Sustainable Development*, 2012, vol. 16, Iss. 4, pp. 415–420.
7. Aristov A.V. Elektropriwod kolebatelnogo dvizheniya s reguliruemoy neytralyu polozheniya [Oscillating motion electric drive with an adjustable position neutral]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 4, pp. 128–131.
8. Dementev Yu.N. Optimalnoe upravlenie ventilnym preobrazovatelem v elektroprivodakh peremennogo toka [Optimum control of a valve converter in alternating current electric drives]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 138–142.
9. Oguz Y., Dede M. Speed estimation of vector controlled squirrel cage asynchronous motor with artificial neural networks. *Energy Conversion and Management*, 2011 January, vol. 52, Iss. 1, pp. 675–686.
10. Semykina Yu.I., Zavyalov V.M., Glazko M.A. Gradientnoe upravlenie mnogodvigatelnykh asinkhronnykh elektroprivodov [Gradient control of multi-engine asynchronous electric drive]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 4, pp. 65–69.
11. Lysenko O.A., Degtyarev A.V., Khamitov R.N. Modelirovanie elektrotehnicheskogo kompleksa v sisteme «asinhronnyy dvigatel – tsentrobezhnyy nasos» [Simulation of electrical complex in «induction motor – centrifugal pump» system]. *Izvestiya Transsiba*, 2013, no. 3 (15), pp. 30–35.
12. Tyuteva P.V. Algoritmy otsenki effektivnosti raboty asinkhronnykh dvigateley v nasosnykh agregatakh [Algorithm of assessing overall performance of asynchronous engines in pump units]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 4, pp. 74–79.
13. Fedorenko A.A., Lazovsky E.N., Pechatnov M.A. Uravneniya dinamiki asinkhronnoy mashiny, invariantnye k skorosti vrashcheniya sistemy koordinat [The dynamics equations of asynchronous machine invariant to rotation speed of coordinate system]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 4, pp. 142–146.
14. Ryakhina E.Yu., Kovalev Yu.Z., Lysenko O.A. Usloviya fizicheskoy realizuemosti matematicheskikh modeley asinkhronnykh dvigateley [Conditions of physical feasibility of mathematical models of asynchronous engines]. *Promyshlennaya energetika*, 2012, no. 1, pp. 47–50.
15. Szolc T., Konowrocki R., Michajlow M., Pręgoswska A. An investigation of the dynamic electromechanical coupling effects in machine drive systems driven by asynchronous motors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, vol. 49, pp. 118–134.
16. Kostyshin V.S. Modelirovanie rezhimov raboty tsentrobezhnykh nasosov na osnove elektrogidravlicheskoy analogii. *Dis. Dokt.*

- nauk* [Simulation of operation modes of centrifugal pumps based on electro analogy. Dr. Diss.] Ivano-Frankovsk, 2000. 115 pp.
17. Tatevosyan A.A. Sintez mnogokonturnoy skhemy zameshcheniya elastomerov [Synthesis of multi-loop equivalent circuit of elastomers]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, 2013, vol. 9, no. 3, pp. 24–30.
 18. Zinovev N.T. Ispolzovanie elektrogidravlicheskoй tekhnologii dlya sozdaniya buronabivnykh svay [Electrohydraulic technology to create bored piles]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 173–176.
 19. Lysenko O.A. *Sistema upravleniya tsentrobezhnym nasosom* [Centrifugal pump management system]. Patent RF no. 2511934, 2014.
 20. Lysenko O.A., Khamitov R.N. Sistema stabilizatsii napora ustanovok tsentrobezhnykh nasosov so skalyarnym upravleniem chastyoty vrashcheniya asinkhronnogo dvigatelya [Pressure stabilization system in centrifugal pumps installations with scalar management of asynchronous engine rotation frequency]. *Izvestiya Transsiba*, 2013, no. 4 (16), pp. 25–30.

Received 20 May 2014.