

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭНЕРГЕТИКА. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.313

**О. А. ЛЫСЕНКО  
А. И. МИРОШНИК**Омский государственный  
технический университет

## РЕЖИМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА: ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАСОС — АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Исследуются режимы энергосбережения электромеханического комплекса: центробежный насос — асинхронный двигатель (АД—ЦН). Определяются регулировочные характеристики при скалярном частотном управлении асинхронным двигателем. Приводятся результаты численного моделирования.

**Ключевые слова:** энергосбережение, асинхронный двигатель, центробежный насос.

Турбомеханизмы, к которым относятся и центробежные насосы для перекачки воды и других жидкостей, потребляют до 25% всей вырабатываемой электроэнергии и заключают в себе громадные резервы энергосбережения. Работа этих систем отличается неравномерным потреблением воды, тепловой энергии в зависимости от погодных условий, времени года.

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.

Одной из целей энергоэффективности (оптимизации) частотно-регулируемых электроприводов является достижение экстремума функции потерь мощности. Задача оптимизации в системе асинхронный двигатель — центробежный насос (АД — ЦН) 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 и скорости механиче-

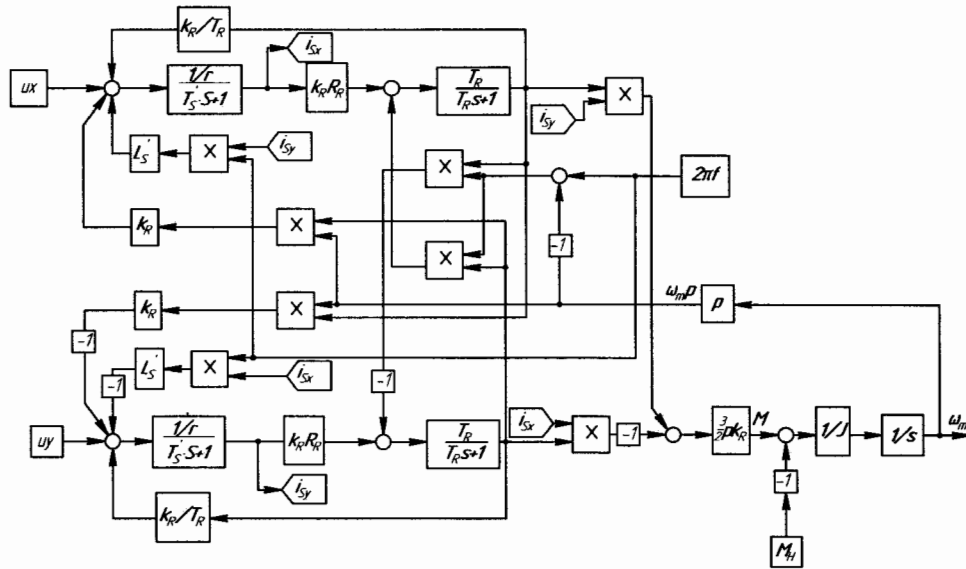


Рис. 1. Структурная схема модели АД

ская 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 электромеханического комплекса: центробежный насос – асинхронный двигатель [1]. Вместо этого приведем результаты численного решения.

В качестве электромеханической подсистемы электромеханического комплекса используется модель асинхронного двигателя. Система уравнений для описания асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в единой системе координат, вращающейся со скоростью  $\omega_0$  будет иметь вид [2]:

$$\begin{cases} u_{sx} = r(1 + T'_s p) i_{sx} - \omega_0 L'_s i_{sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx} - k_R p \Pi \omega_m \psi_{Ry} \\ u_{sy} = r(1 + T'_s p) i_{sy} + \omega_0 L'_s i_{sx} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Ry} + k_R p \Pi \omega_m \psi_{Rx} \\ 0 = -k_R R_R i_{sx} + \frac{1}{T_R} (1 + T_R p) \psi_{Rx} - (\omega_0 - p \Pi \omega_m) \psi_{Ry} \\ 0 = -k_R R_R i_{sy} + \frac{1}{T_R} (1 + T_R p) \psi_{Ry} + (\omega_0 - p \Pi \omega_m) \psi_{Rx} \\ M = \frac{3}{2} p \Pi k_R (\psi_{Rx} i_{sy} - \psi_{Ry} i_{sx}) \\ p \omega_m = \frac{M - M_n}{J} \end{cases} \quad (1)$$

где  $u_{sx}$ ,  $u_{sy}$ ,  $i_{sx}$ ,  $i_{sy}$ ,  $\psi_{sx}$ ,  $\psi_{sy}$  – проекции на оси x, y вращающейся системы напряжения и тока статора, и потокосцепления ротора соответственно.  $J$  (кг/м<sup>2</sup>) – момент инерции на валу машины, учитывающий инерционность как самой машины, так и приведенной к валу инерционности рабочего механизма,  $\omega_m$ ,  $\omega_0$  – частота вращения ротора, и частота вращения статора.  $M$  – развиваемый момент;  $M_n$  – момент на валу машины.

$$k_R = \frac{L_m}{L_R}, T_R = \frac{L_R}{R_R}, r = R_S + k_R^2 R_R,$$

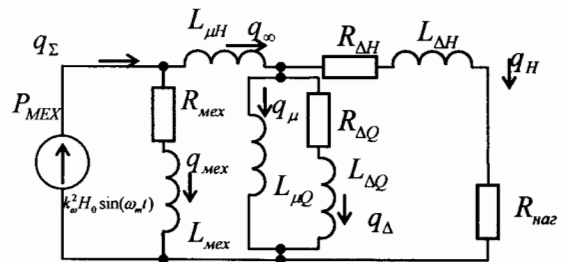


Рис. 2. Модель ЦН на основе электрогидравлических аналогий

$$L'_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_R}, T'_s = \frac{L'_s}{r},$$

где  $L_s$ ,  $L_R$ ,  $L_m$  – индуктивности статора, ротора и взаимоиндуктивность между статором и ротором соответственно.  $R_s$ ,  $R_R$  – активное сопротивление статора и ротора.

С помощью данной системы уравнений можно составить структурную схему, представленную на рис. 1, где входными воздействиями будут проекции вектора напряжения статора  $u_{sx}$  и  $u_{sy}$ , частота сети  $\omega_0 = 2\pi f$ , а также момент нагрузки  $M_n$ .

В качестве гидравлической подсистемы используется модель, полученная на основе метода электрогидравлических аналогий [3], – электрическая схема (рис. 2) с параметрами:

$L_{\mu Q}$  – 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;

$R_{\Delta OH}$  – активное сопротивление, учитывающее потери напора в отводе;

$L_{\Delta H}$  – индуктивность, учитывающая потери напора в отводе.

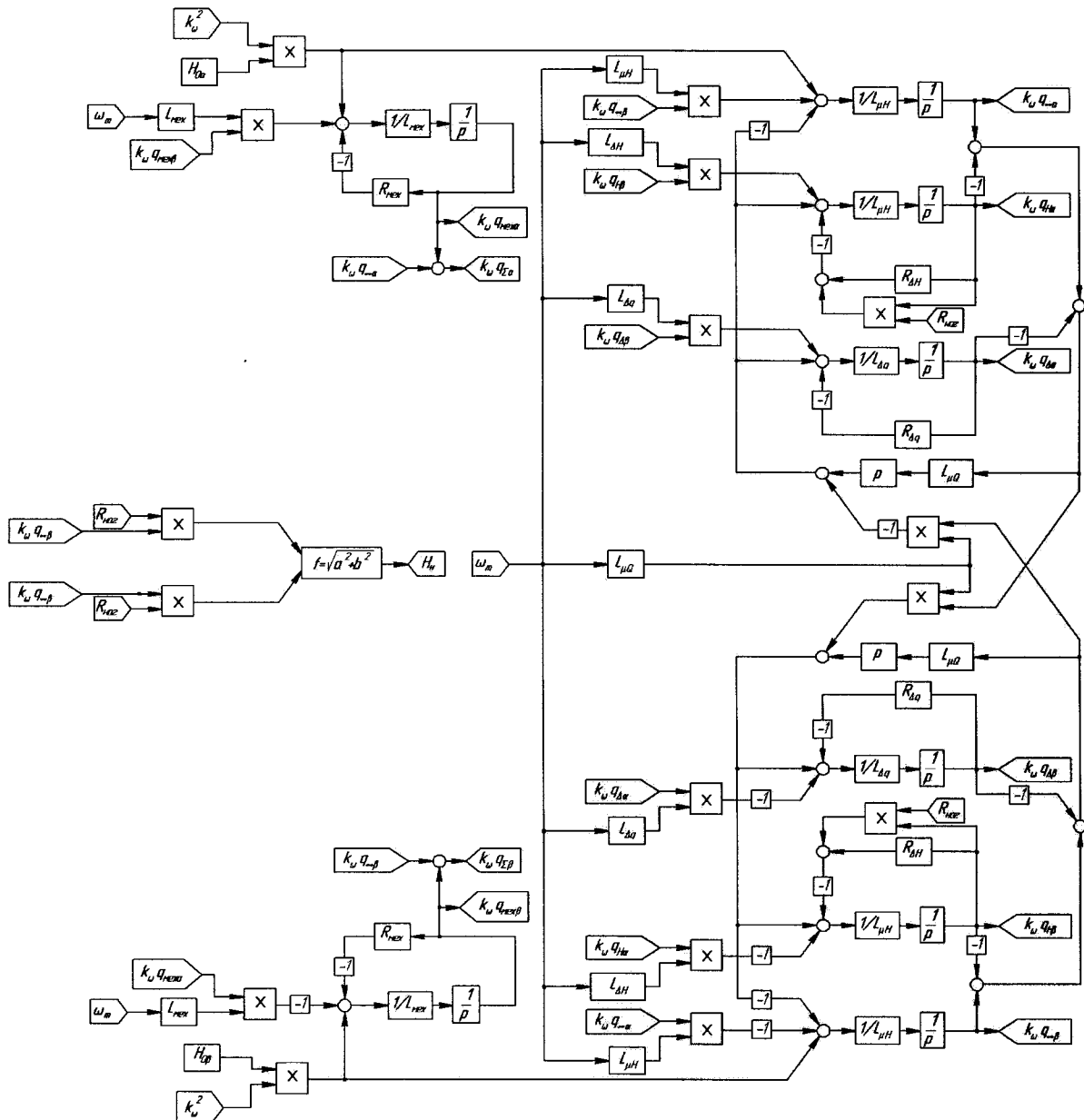


Рис. 3. Структурная схема модели ЦН

$$\begin{cases}
 k_{\omega}^2 h_{0\alpha} = R_{\text{мех}} k_{\omega} q_{\text{мех}\alpha} + L_{\text{мех}} p k_{\omega} q_{\text{мех}\alpha} - \omega_m L_{\text{мех}} k_{\omega} q_{\text{мех}\beta} \\
 k_{\omega}^2 h_{0\beta} = R_{\text{мех}} k_{\omega} q_{\text{мех}\beta} + L_{\text{мех}} p k_{\omega} q_{\text{мех}\beta} + \omega_m L_{\text{мех}} k_{\omega} q_{\text{мех}\alpha} \\
 k_{\omega}^2 h_{0\alpha} = L_{\mu\text{H}} p k_{\omega} q_{\text{с}\alpha\alpha} - \omega_m L_{\mu\text{H}} k_{\omega} q_{\text{с}\alpha\beta} + L_{\mu\text{Q}} p k_{\omega} q_{\mu\alpha} - \omega_m L_{\mu\text{Q}} k_{\omega} q_{\mu\beta} \\
 k_{\omega}^2 h_{0\beta} = L_{\mu\text{H}} p k_{\omega} q_{\text{с}\alpha\beta} + \omega_m L_{\mu\text{H}} k_{\omega} q_{\text{с}\alpha\alpha} + L_{\mu\text{Q}} p k_{\omega} q_{\mu\beta} + \omega_m L_{\mu\text{Q}} k_{\omega} q_{\mu\alpha} \\
 L_{\mu\text{Q}} p k_{\omega} q_{\mu\alpha} - \omega_m L_{\mu\text{Q}} k_{\omega} q_{\mu\beta} = R_{\Delta\alpha} k_{\omega} q_{\Delta\alpha} + L_{\Delta\alpha} p k_{\omega} q_{\Delta\alpha} - \omega_m L_{\Delta\alpha} k_{\omega} q_{\Delta\beta} \\
 L_{\mu\text{Q}} p k_{\omega} q_{\mu\beta} + \omega_m L_{\mu\text{Q}} k_{\omega} q_{\mu\alpha} = R_{\Delta\beta} k_{\omega} q_{\Delta\beta} + L_{\Delta\beta} p k_{\omega} q_{\Delta\beta} + \omega_m L_{\Delta\beta} k_{\omega} q_{\Delta\alpha} \\
 L_{\mu\text{Q}} p k_{\omega} q_{\mu\alpha} - \omega_m L_{\mu\text{Q}} k_{\omega} q_{\mu\beta} = (R_{\Delta\text{H}} + R_{\text{нас}}) k_{\omega} q_{\text{H}\alpha} + L_{\Delta\text{H}} p k_{\omega} q_{\text{H}\alpha} - \omega_m L_{\Delta\text{H}} k_{\omega} q_{\text{H}\beta} \\
 L_{\mu\text{Q}} p k_{\omega} q_{\mu\beta} + \omega_m L_{\mu\text{Q}} k_{\omega} q_{\mu\alpha} = (R_{\Delta\text{H}} + R_{\text{нас}}) k_{\omega} q_{\text{H}\beta} + L_{\Delta\text{H}} p k_{\omega} q_{\text{H}\beta} + \omega_m L_{\Delta\text{H}} k_{\omega} q_{\text{H}\alpha} \\
 q_{\Sigma\alpha} = q_{\text{мех}\alpha} + q_{\text{с}\alpha\alpha} \\
 q_{\Sigma\beta} = q_{\text{мех}\beta} + q_{\text{с}\alpha\beta} \\
 q_{\text{с}\alpha\alpha} = q_{\mu\alpha} + q_{\Delta\alpha} + q_{\text{H}\alpha} \\
 q_{\text{с}\alpha\beta} = q_{\mu\beta} + q_{\Delta\beta} + q_{\text{H}\beta}
 \end{cases}$$

Формула 2

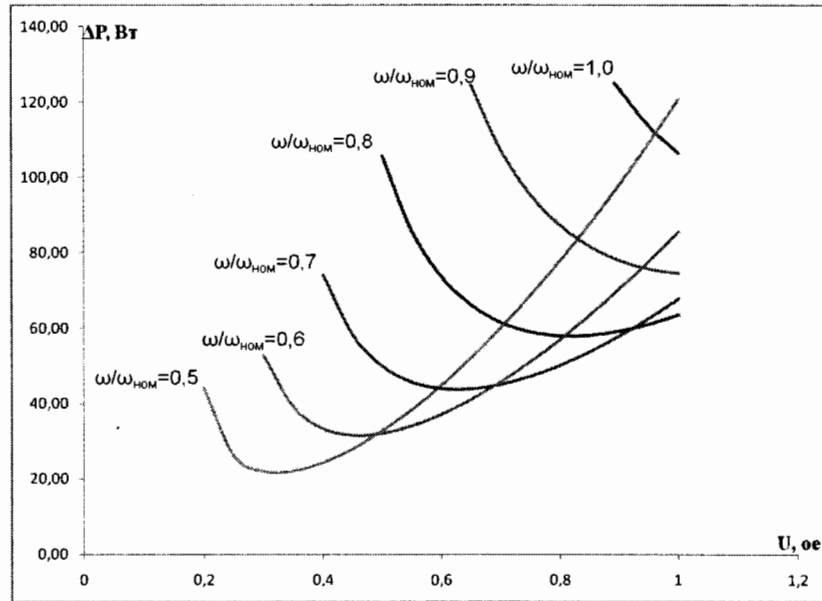


Рис. 4. Зависимость потерь  $\Delta P$  в АД типа АД80М2У3 от напряжения ( $P=1,5$  кВт) при разных скоростях

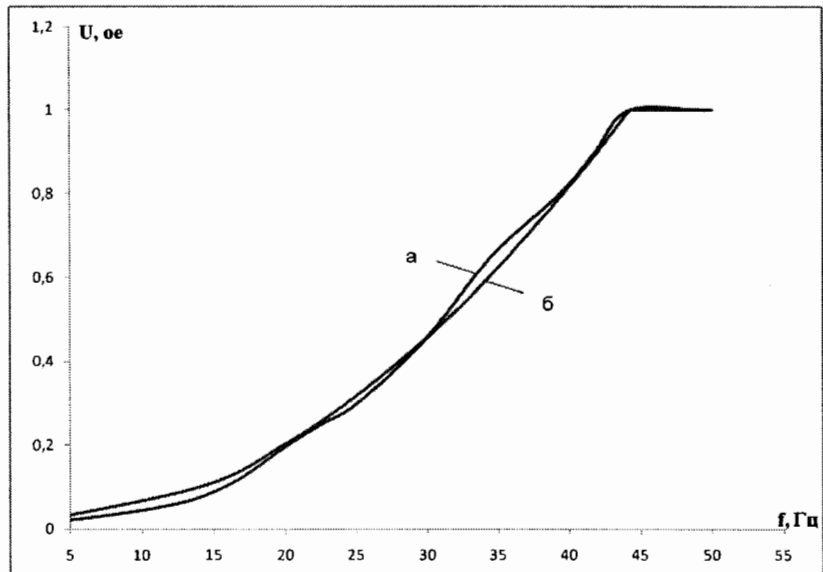


Рис. 5. Регулировочные характеристики а – точная, б – аппроксимированная

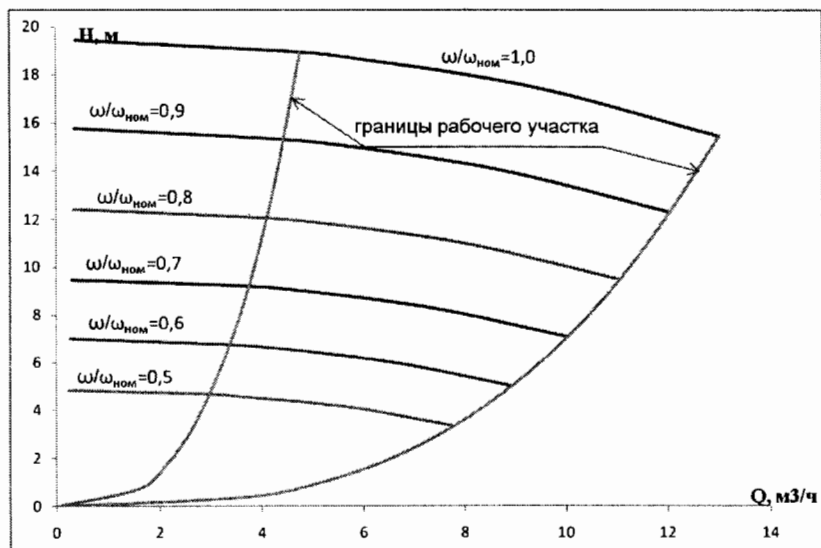


Рис. 6. Напорные характеристики ЦН при регулировании скорости вращения АД

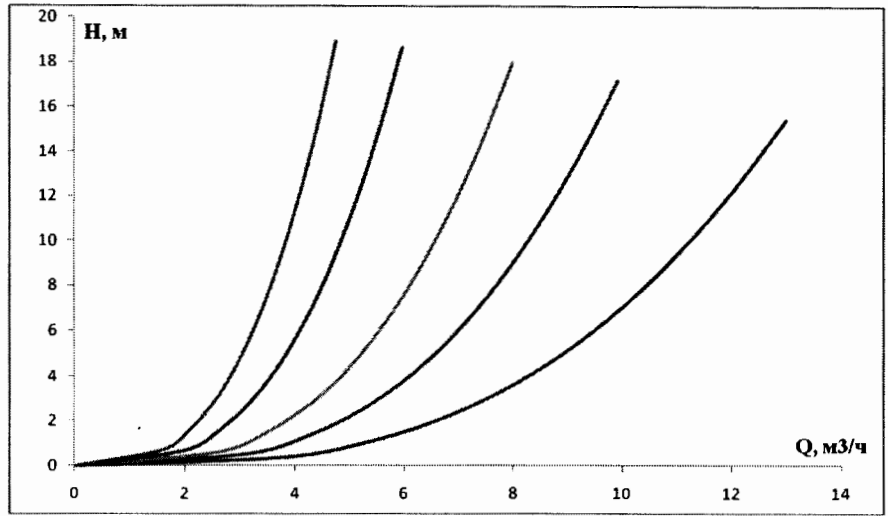


Рис. 7. Зависимости сопротивлений напорной магистрали

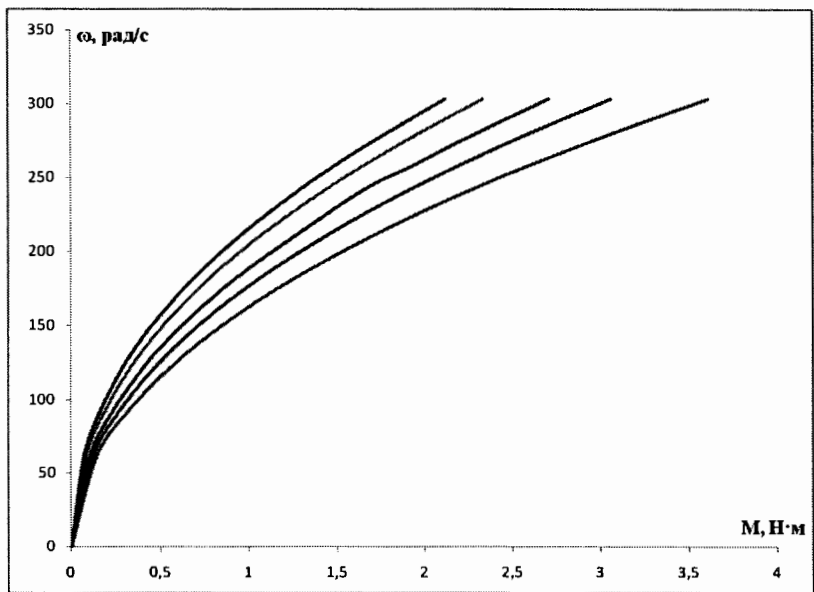


Рис. 8. Зависимости момента сопротивления ЦН при различных сопротивлениях напорной магистрали

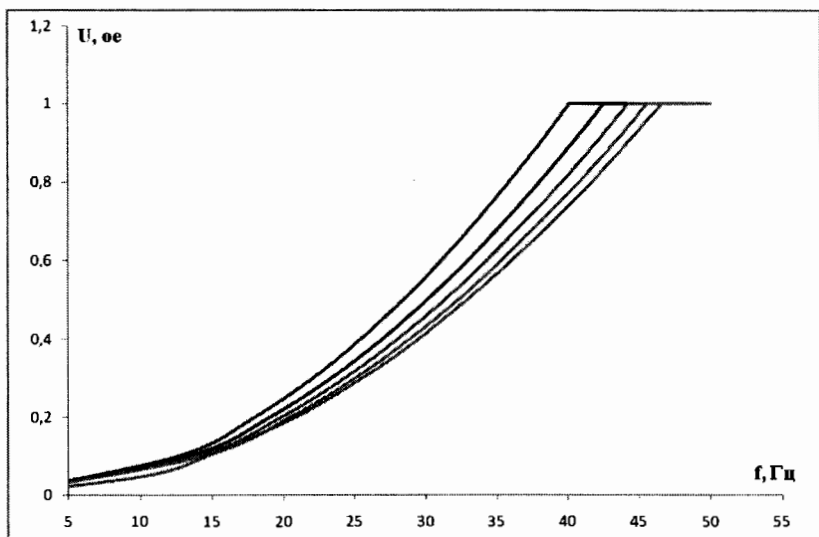


Рис. 9. Регулировочные характеристики при различных сопротивлениях напорной магистрали

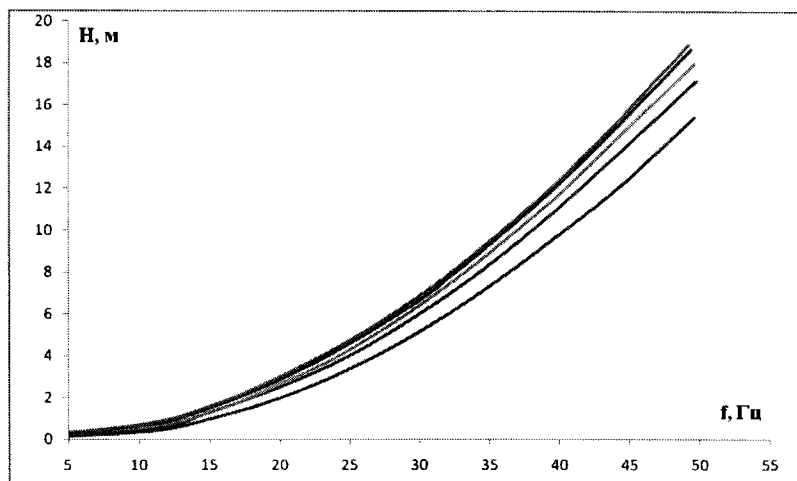


Рис. 10. Регулировочные характеристики напора при различных сопротивлениях напорной магистрали

Для схемы на рис. 1 в операторной форме можно записать так (формула 2).

С помощью данной системы уравнений можно составить структурную схему, представленную на рис. 3, где входными воздействиями будут проекции вектора напора холостого хода  $h_{0\alpha}$  и  $h_{0\beta}$ , частота вращения ротора АД (частота вращения рабочего колеса)  $\omega_m$ , а также сопротивление нагрузки  $R_{нагр}$ .

Уравнения связи между двигателем и насосом записываются, исходя из равенства механических мощностей, потребляемых насосом и вырабатываемых двигателем:

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

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

Совместно рассматривая уравнения (1), (2) и (3), получим динамическую модель для электромеханического преобразователя.

Алгоритм оптимизации потерь мощности двигателя выглядит следующим образом:

- задается расход насоса  $q_H$  и угловая скорость  $\omega_m$ ;
- задается действующее значение напряжения  $U$ , приложенное к двигателю;
- численно находится такая скорость  $\omega_\theta$ , которая при расчете действительного расхода  $q$  дает результат  $q = q_H$ ;
- рассчитываются суммарные потери мощности в двигателе и строится соответствующая зависимость (рис. 4);
- в процессе расчета определяется точка с минимумом потерь мощности, строится регулировочная характеристика (рис. 5, зависимость а).

Если проанализировать полученные результаты (рис. 5, зависимость а), то можно сказать, что полученная характеристика аппроксимируется до составной кривой, состоящей из квадратичной зависимости с некоторым коэффициентом и линейного участка прямой (рис. 5, зависимость б), что частично подтверждает ранее известные знания о том, что для электроприводов с вентиляторной механической характеристикой следует использовать квадратичную зависимость.

Однако полученный результат будет соответствовать только одному режиму с определенным сопротивлением напорной магистрали ( $Q = Q_{ном}$ , при  $\omega_m = \omega_{ном}$ ). 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  $\omega_m$  и характеристикой трубопровода (рис. 6). Различным сопротивлениям напорной магистрали (рис. 7) будут отвечать различные механические характеристики сопротивления асинхронного двигателя (рис. 8).

По предложенной методике можно также определить регулировочные характеристики (рис. 9) и для семейства кривых (рис. 7). На рис. 9 левее проходят регулировочные характеристики, имеющие меньшее гидравлическое сопротивление. Кроме того, для соответствующих регулировочных характеристик строится зависимость напора от частоты (рис. 10), где правее расположены характеристики, имеющие меньшее гидравлическое сопротивление.

Таким образом, зная сопротивление напорной магистрали и используя данную методику для построения регулировочных характеристик, можно получить наиболее экономичный режим работы электромеханического комплекса АД – ЦН.

#### Библиографический список

1. Лысенко, О. А. Исследование динамических характеристик электромеханического комплекса: центробежный насос - асинхронный двигатель / О. А. Лысенко, А. С. Солодянкин // Омский научный вестник. — Омск, 2010. — № 2(90). — С. 148 — 151.
2. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. — М., 1994. — 327 с.
3. Костышин В. С. Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии : дис. ... д-ра техн. наук. — Ивано-Франковск, 2000. — 115 с.

**ЛЫСЕНКО Олег Александрович**, старший преподаватель кафедры «Электрическая техника».  
**МИРОШНИК Анатолий Иванович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника».

Адрес для переписки: e-mail: deolas@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.03.2011 г.

© О. А. Лысенко, А. И. Мирошник

## РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ТРЕХКООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКОВ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В статье предлагается применение метода трехкоординатных измерений и его особенности в конструкции трехкоординатного электроиндукционного сферического датчика напряженности электростатического поля.

**Ключевые слова:** электростатическое поле, метод трехкоординатных измерений, напряженность.

Метод трехкоординатных измерений напряженности электростатического поля (ЭП) относится к методам, основанным на взаимодействии датчика с полем. Для реализации этого метода предполагается использование трехкоординатного датчика при котором в процессе измерения учувствуют все три его координаты. Метод трехкоординатных измерений (МТИ) формулируется следующим образом: помещают в исследуемое пространство двойной трехкоординатный электроиндукционный сферический датчик (ТЭСД), имеющий три пары проводящих чувствительных элементов, входящих в общий датчик; располагают центры наружных поверхностей чувствительных элементов попарно на трех осях выбранной системы координат симметрично относительно её начала; находят три составляющие вектора напряженности ЭП по координатным осям датчика [1].

Для измерения параметров ЭП используются датчики различных конструкций. В работах [2, 3] разработан трехкоординатный датчик напряженности ЭП, реализующий МТИ. Отмечено [2, 3], что сферическая форма трехкоординатных датчиков, принцип работы которых основан на электрической

индукции, является наиболее оптимальной для измерения параметров ЭП. Предлагаемая конструкция ТЭСД представлена на рис. 1а и б.

ТЭСД напряженности электростатического поля состоит из полой проводящей сферы радиуса  $R$ , на поверхности которой расположены три пары диаметрально противоположных круглых окон. Каждая пара круглых окон расположена на соответствующих координатных осях  $X, Y, Z$  с радиусом  $r_{ок}$ . Внутри сферы расположен вращающийся на валу челнок. Ось вала проходит через центр сферы и располагается на равных угловых расстояниях от координатных осей круглых окон. На челноке изолировано друг от друга находятся три пары диаметрально противоположных проводящих чувствительных элементов (ЧЭ)  $S_1-S_2, S_3-S_4$  и  $S_5-S_6$ , радиусы которых совпадают с радиусами окон  $r_{ок} = r_{чЭ}$  ( $H_1-H_2, H_3-H_4$  и  $H_5-H_6$ ). ЧЭ в общем случае выполняются в форме сферического сегмента, с внешним угловым размером  $\theta_0$ , являющимся его конструктивным параметром. ЧЭ располагаются по трем ортогональным осям  $X, Y, Z$  декартовой системы координат, начало которой совпадает с центром сферы. Расположим

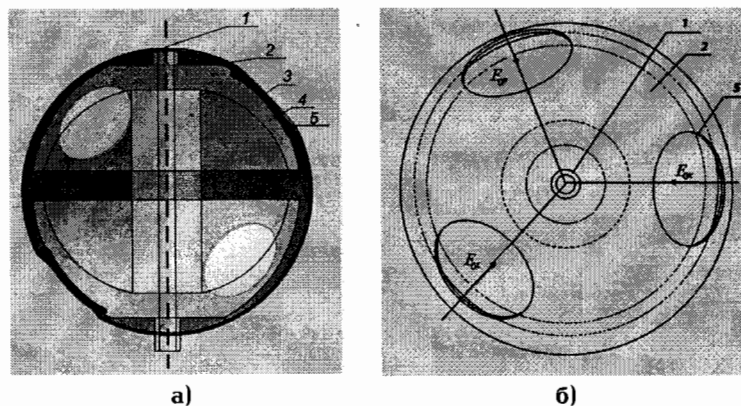


Рис. 1. Конструкция ТЭСД: 1 – ось датчика; 2 – защитный кожух; 3 – чувствительный элемент; 4 – вращающийся челнок, на котором расположены чувствительные элементы; 5 – круглые окна: а) разрез ТЭСД, б) вид сверху ТЭСД

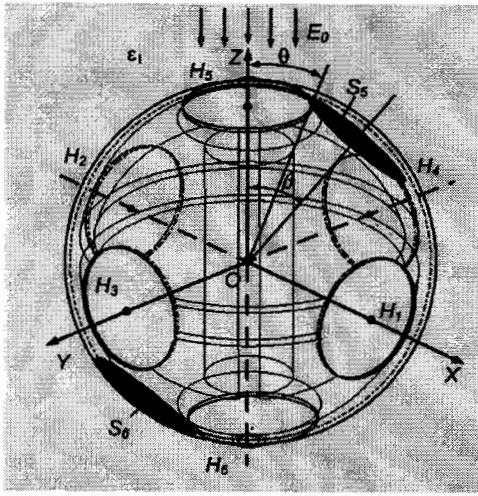


Рис. 2. Конструктивная модель ТЭСД с тремя парами отверстий ( $H_1$ - $H_6$ ) по осям  $X, Y, Z$  и модель вращающегося ЧЭ  $S_5$  и  $S_6$  относительно оси  $Z$  в момент времени  $t=0$

координатные оси датчика так, как изображено на рис. 2. ТЭСД находится в однородной изотропной среде с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$ , в которой существует постоянное во времени ЭП. Благодаря сферической форме экранирующего корпуса и возможности перекрытия всех отверстий одинаковыми ЧЭ, укрепленными на одном валу, повышается точность измерения вектора напряженности электростатического поля [3].

Принцип действия датчика напряженности ЭП заключается в том, что при механическом движении (а именно при вращении) на его ЧЭ индуцируются электрические заряды, величина которых определяется выражением [1]:

$$Q(\beta) = k \cdot \epsilon_1 \cdot S(\beta) \cdot E_{cp}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий форму и размеры ЧЭ датчика, а также параметры взаимодействия датчика с источником поля;  $\epsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится проводящая сфера;  $S(\beta)$  – изменение площади ЧЭ при вращении вала,  $\beta = \omega t$ ;  $E_{cp}$  – результирующая средняя поверхностная напряженность электростатического поля на ЧЭ.

Наведенный ток на ЧЭ, который используется в качестве измеряемой величины, определяется изменением количества заряда  $Q$  на ЧЭ в течение времени  $t$ .

При этом следует обратить внимание, что при повороте ЧЭ на некоторый пространственный угол  $\beta = \omega t$  стекает именно то количество заряда  $Q$ , которое на поверхности ЧЭ с углом  $\beta$  распределено в виде поверхностного заряда (или нормальной составляющей напряженности ЭП) на поверхности проводящей сферы, тогда изменение выходного тока:

$$i(\beta) = dQ(\beta)/d(\beta) \quad (2)$$

Так как угловая скорость вращения вала  $\omega$  принимается постоянной, то ее можно вынести за пределы дифференцирования, тогда

$$i(t) = \omega(dQ(t)/dt). \quad (3)$$

Согласно (1), (2) и (3), дифференциальный ток между диаметрально противоположными ЧЭ, распо-

ложенными на координатных осях  $X, Y$  и  $Z$  датчика соответственно, найдется:

$$i_{X,Y,Z}(t) = (i_{x_{S1},y_{S3},z_{S5}} - i_{x_{S2},y_{S4},z_{S6}}) = \omega \cdot k \cdot \epsilon_1 \cdot \frac{dS(t)}{dt} \cdot E_{cp,X,Y,Z}, \quad (4)$$

где  $S(t)$  – изменение площади ЧЭ в результате вращения челнока. Изменение площади диаметрально противоположных ЧЭ осуществляется по одному закону.

Периодическое изменение площади ЧЭ в форме сферического сегмента при его пересечении и окна в сфере в результате вращения челнока найдено в работе [3]:

$$S(t) = 2 \cdot R^2 \cdot \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin \left( \frac{2 \cdot \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\omega t}{2}\right)^2}{\operatorname{tg}(\theta)^2} + \operatorname{tg}\left(\frac{\omega t}{2}\right)^2 - 1}{1 + \operatorname{tg}\left(\frac{\omega t}{2}\right)^2} \right) - 2 \cdot \cos(\theta) \cdot \operatorname{arccos} \left( \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\omega t}{2}\right)}{\operatorname{tg}(\theta)} \right) \right], \quad (5)$$

где  $R$  – радиус сферы;  $\theta$  – широтный угол сферической системы координат;  $\omega$  – угловая скорость вращения ЧЭ.

Согласно используемому методу МТИ, средняя поверхностная напряженность для ТЭСД определяется геометрическим суммированием составляющих:

$$E_{cp,X,Y,Z} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2},$$

где  $E_x, E_y, E_z$  – средние дифференциальные напряженности диаметрально-противоположных ЧЭ, расположенных по координатным осям  $X, Y, Z$ .

Размер ЧЭ следует из расчета минимума погрешностей от неоднородности поля и ориентации датчика в пространстве в широком пространственном диапазоне измерения. Для этого предлагается математическая модель, позволяющая задавать ориентацию датчика в пространстве двумя углами  $\delta$  – долготным углом и  $\Delta$  – широтным углом (рис. 3) [4]. В ходе математического моделирования поведения ТЭСД в неоднородном поле были получены графические зависимости погрешности у ТЭСД от ориентации датчика в пространстве, пространственного диапазона измерения  $a$  ( $a = R/d$ ,  $R$  – радиус корпуса датчика,  $d$  – расстояние от центра датчика до источника поля) и конструктивных размеров чувствительного электрода датчика  $\theta_0$ . Было установлено, что три наилучших положения для граничных угловых пространственных положения ТЭСД с точки зрения максимальной погрешности, а именно: 1 случай:  $\delta = 0 \Delta = 0$ ; 2 случай:  $\delta = 0 \Delta = 54,736^\circ$ ; 3 случай:  $\delta = 60 \Delta = 35,264^\circ$  (рис. 3).

По графическим зависимостям погрешности датчика у от его ориентации в неоднородном электростатическом поле при различных расстояниях от источника поля  $a$  и значениях широтного  $\Delta$  и долготного  $\delta$  углов (рис. 4) установлено, что для ТЭСД меньшую погрешность датчика от неоднородности ЭП при большом пространственном диапазоне  $a$  обеспечит выбор конструктивного размера ЧЭ [4].

В результате при построении ТЭСД напряженности ЭП выбран  $\theta = 45^\circ$  как предельно возможный угловой размер, при котором происходит соприкосно-



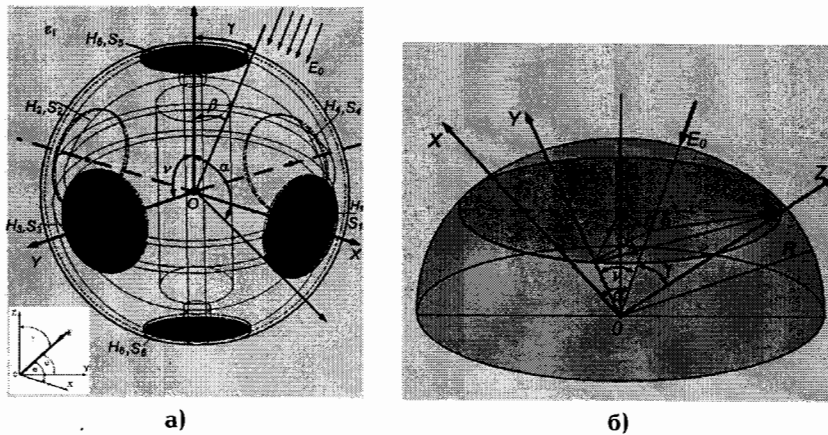


Рис. 3.

а) ТЭСД при произвольной ориентации его ЧЭ к направлению действия ЭП в момент совмещения всех пар ЧЭ  $S_1-S_6$  и отверстий  $H_1-H_6$ ,  
 б) уточнение направления вектора  $E_0$  относительно осей X, Y, Z

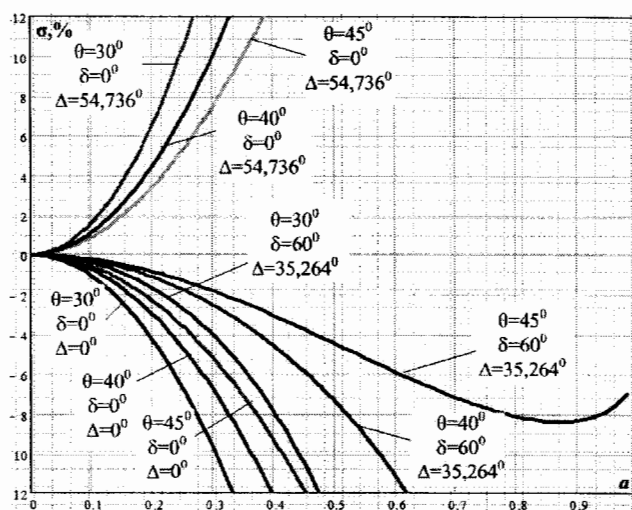


Рис. 4. График зависимости погрешности датчика  $\sigma$  от его ориентации в неоднородном электростатическом поле при различных расстояниях от источника поля  $\alpha$  и значениях широтного  $\Delta$  и долготного  $\delta$  углов для конструктивных размеров ЧЭ  $\theta=30^\circ, \theta=40^\circ, \theta=45^\circ$

вание ЧЭ в шестиэлементном датчике. Ограничение угловых размеров определяется возможностями физического исполнения ЧЭ.

Таким образом, МТИ позволяет без ориентации в пространстве измерять составляющие вектора напряженности ЭП. Такой подход к измерению вектора напряженности ЭП дает возможность избавиться от трудоемкой операции-необходимости ориентировать датчик по направлению ЭП, как это делается при измерении однокоординатным датчиком. Полученные данные положены в основу разработки высокоточных изотропных датчиков напряженности ЭП в широком пространственном диапазоне.

#### Библиографический список

1. Бирюков, С. В. Физические основы измерения параметров электрических полей : монография / С. В. Бирюков. — Омск : СибАДИ, 2008. — 112 с.
2. Баранова, С. С. Вращающийся сферический датчик в постоянном электрическом поле / С. С. Баранова, С. В. Бирюков // Приборы. — Москва, 2009. — № 9 (111). — С. 53–55.
3. Баранова, С. С. Расчет напряженности электрического поля сферическим датчиком / С. С. Баранова, С. В. Бирюков // Акту-

альные проблемы электронного приборостроения. АПЭП-2010 : материалы X Международной конференции. — Новосибирск, 2010. — Т. 2. — С. 87–90.

4. Тимонина, Е. В. Сравнительный анализ работы трехкоординатного электроиндукционного сферического датчика напряженности в электрических полях различной неоднородности / Е. В. Тимонина // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — Омск : ОмГТУ, 2008. — № 1 (64). — С. 114–120.

**БИРЮКОВ Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования машин и технологических процессов».

**КОЛМОГорова Светлана Сергеевна**, аспирантка кафедры «Системы автоматизированного проектирования машин и технологических процессов», инженер-программист Центра информационных технологий.

Адрес для переписки: e-mail: lightsun@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.02.2011 г.

© С. В. Бирюков, С. С. Колмогорова