

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья
УДК 621.314<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-284-296>

Исследование режимов работы технологического комплекса электропривод–турбомеханизм–трубопроводная магистраль

Владимир Евгеньевич Павлов¹✉¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия
¹pview52@mail.ru

Резюме. Цель работы – разработка математической модели технологического комплекса асинхронный двигатель–турбомеханизм–трубопроводная магистраль. Анализ пусковых режимов проводился методом нелинейного дифференциального исчисления и графоаналитическим методом. Расчеты выполнялись на моделях с применением программного комплекса MATLAB. Рассчитаны переходные процессы по расходу и напору, коэффициентам полезного действия механизма насоса и всей насосной установки, по току статора, угловой частоте и моменту вращения асинхронного двигателя при пуске насоса и увеличении коэффициента сопротивления трубопроводной магистрали в 2, в 5, в 10 и в 1000 раз. Исследования показали, что при увеличении коэффициента сопротивления магистрали в 10 раз производительность насоса снижается в 2,8 раза; напор возрастает в 1,28 раза; момент, ток статора и скорость асинхронного двигателя изменяются незначительно: момент и ток уменьшаются в 1,167 и 1,034 раза, соответственно, а скорость возрастает в 1,0046 раза; коэффициенты полезного действия механизма насоса и всей насосной установки (с учетом двигателя) снижаются в 1,78 и в 1,89 раза, соответственно. Время пуска двигателя насоса составляет 0,5 с, максимальный ток статора при пуске в 4,39 раза превышает номинальное значение, установившееся значение тока статора не более 59,3% от номинального. Установлено, что разработанная математическая модель технологического комплекса асинхронный двигатель–турбомеханизм–трубопроводная магистраль для насоса позволяет получить количественные оценки эксплуатационных и энергетических параметров установки при пуске и управлении производительностью насоса методом дросселирования.

Ключевые слова: турбомеханизмы, асинхронный двигатель, напор и подача, трубопроводная магистраль, модель электропривода

Для цитирования: Павлов В.Е. Исследование режимов работы технологического комплекса электропривод–турбомеханизм–трубопроводная магистраль // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 284–296. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-284-296>.

ENERGY INDUSTRY

Original article

Study of operational modes of an "electric drive–turbomachinery–pipeline" technological complex

Vladimir E. Pavlov¹✉¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
¹pview52@mail.ru

Abstract. A developed mathematical model of an asynchronous motor – turbomachinery pipeline technological complex is presented. An analysis of starting conditions is carried out by a nonlinear differential calculus and graphic analytical method. The calculations for the model were performed using the MATLAB software package. The flow, head, efficiency of the pump mechanism and entire pump unit, stator current, angular frequency and torque of the asynchronous motor were calculated at pump start-up and with an increase of pipeline resistance coefficient by 2, 5, 10, and 1000 times. At an increase in the pipeline resistance coefficient by 10 times, the pump efficiency is shown to be reduced by 2.8 times, while the head is increased by 1.28 times; meanwhile, the torque, stator current, and rotational speed of the asynchronous motor change insignificantly. The torque and current decrease by 1.167 and 1.034 times, respectively, while

the speed increases by 1.0046 times; the efficiency of the pump mechanism and pump assembly (including motor) decreases by 1.78 and 1.89 times, respectively. The start-up time of the pump motor equals 0.5 s; the maximum stator current at start-up exceeds the nominal value by 4.39 times; the steady-state stator current comprises no more than 59.3% of the nominal value. The developed mathematical model of the asynchronous motor – turbomachinery – pipeline technological complex is established to allow the operational and energy parameters of the unit to be quantitatively estimated at start-up, while the pump capacity is capable of being controlled by throttling.

Keywords: turbomechanisms, induction motor, head and feed, pipeline, electric drive model

For citation: Pavlov V. E. Study of operational modes of an "electric drive–turbomachinery–pipeline" technological complex. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):284-296. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-284-296>.

ВВЕДЕНИЕ

Электропривод турбомеханизмов (насосов, вентиляторов, дымососов, аппаратов воздушного охлаждения, компрессоров) потребляет по различным оценкам от 25% до 30% вырабатываемой в мире электроэнергии [1, 2]. Поэтому достоверное математическое описание процессов, происходящих в электроприводах турбомеханизмов, является экономически целесообразной задачей. Вопросы управления производительностью турбомеханизмов с целью энергосбережения проанализированы в работах многих авторов [3–9]. Особенности решения таких задач рассматриваются в различных литературных источниках [10–17].

Цель работы – получить количественную оценку эксплуатационных и энергетических параметров технологического комплекса асинхронный двигатель–турбомеханизм–трубопроводная магистраль при управлении производительностью методом дросселирования.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Для разработки математических моделей устройств технологической схемы электропривод – турбомеханизм – трубопроводная магистраль воспользуемся подходами, изложенными в [18].

Режимы работы электроприводов определяются в соответствии с уравнением движения:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где M – вращающий момент, развиваемый двигателем, нм; M_c – момент сил сопротивления на валу двигателя, нм; J – суммарный

момент инерции, приведенный к валу двигателя, кг·м²; ω – угловая частота вращения двигателя, рад/с; $J \frac{d\omega}{dt}$ – динамический момент электропривода, нм.

В зависимости от соотношения между моментами M и M_c возможны следующие режимы работы электропривода:

– при $M > M_c$ $d\omega/dt > 0$, то есть имеет место режим разгона электропривода (динамический режим);

– при $M < M_c$ $d\omega/dt < 0$ также имеет место режим торможения электропривода (динамический режим);

– при $M = M_c$ $d\omega/dt = 0$, в этом случае электропривод работает в установившемся режиме (статический режим).

Рабочая точка электропривода в установившемся режиме определяется как точка пересечения механической характеристики двигателя и механической характеристики производственного механизма. На рис. 1 а показана механическая характеристика асинхронного двигателя и производственного механизма при постоянном моменте сопротивления M_c . Причем в точке а будет устойчивый режим работы электропривода, а в точке в – неустойчивый.

Ниже будут рассмотрены более подробно характеристики, представленные на рис. 1 б, где H_c – статический напор в трубопроводной магистрали, Па; Q – объемная производительность механизма (расход), м³/ч.

Для турбомеханизмов на основании закона постоянства момента движения может быть записано следующее уравнение:

$$H - H_{МАГ} = \frac{1}{A_1} \frac{dQ}{dt}, \quad (2)$$

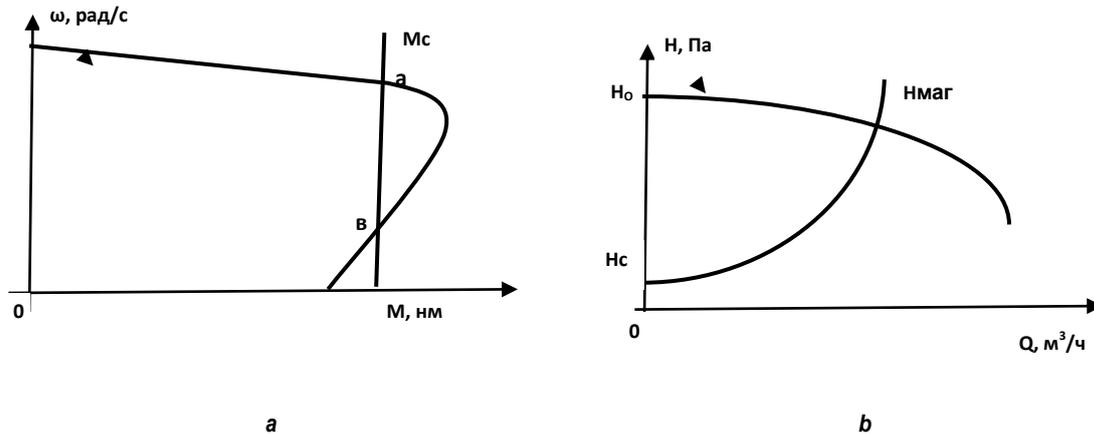


Рис. 1. Механические характеристики асинхронного двигателя и приводимого им механизма (а) и QH-характеристики турбомеханизма и характеристики трубопроводной магистрали (б)
Fig. 1. Mechanical characteristics of the induction motor and the mechanism driven by it (a), turbomechanism QH-characteristics and pipeline characteristics (b)

где H – напор (давление) на входе механизма, Па; H_{Mag} – характеристика трубопроводной магистрали, Па; $1/A_1$ – масса жидкости в трубопроводной магистрали, кг; $\frac{1}{A_1} \frac{dQ}{dt}$ – динамический напор в трубопроводной магистрали. Конструктивно-технологический параметр A_1 определяется выражением:

$$A_1 = \frac{S}{L\gamma}, \quad (3)$$

где $S = \pi d^2/4$ – эквивалентная площадь поперечного сечения трубопроводной магистрали, м^2 ; d – эквивалентный диаметр трубопроводной магистрали, м ; L – эквивалентная длина трубопроводной магистрали, м ; γ – плотность перекачиваемой жидкости или газа, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В зависимости от соотношения между напорами H и H_{Mag} возможны следующие режимы работы турбомеханизма:

– при $H > H_{\text{Mag}}$ $dQ/dt > 0$, то есть имеет место режим разгона турбомеханизма (динамический режим);

– при $H < H_{\text{Mag}}$ $dQ/dt < 0$ также имеет место режим торможения турбомеханизма (динамический режим);

– при $H = H_{\text{Mag}}$ $dQ/dt = 0$, в этом случае турбомеханизм работает в установившемся режиме (статический режим).

Рабочая точка турбомеханизма в устано-

вившемся режиме определяется как точка пересечения QH-характеристики турбомеханизма и характеристики трубопроводной магистрали (рис. 1 б).

Естественная напорная характеристика приводится в технических паспортах турбомеханизмов в виде графической зависимости: $Q = f(H)$. Для удобства анализа напорные характеристики турбомеханизмов аппроксимируют аналитической зависимостью. Для «типовой» QH-характеристики одной из таких аналитических зависимостей является соотношение [19, 20]:

$$H = H'_{0e} - K \cdot Q^2, \quad (4)$$

где $H'_{0e} = H_{0e} \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2 = K_1 \omega^2$, то есть

$$K_1 = \frac{H_{0e}}{\omega_H^2}; H_{0e} - \text{давление на выходе турбо-}$$

механизма при нулевой производительности на естественной характеристике, Па; K – постоянный коэффициент для данного турбомеханизма; ω_H – номинальное значение частоты вращения механизма, рад/с.

Коэффициент K можно найти из напорной характеристики (4) при $H = 0$. В этом случае

$$Q = Q_{\text{макс}} \text{ и } K = \frac{H_{0e}}{Q_{\text{макс}}^2}.$$

В работе [20] показано, что для турбомеханизма с напорной характеристикой вида (4) номинальному режиму соответствует точка с координатами $Q = \frac{Q_{\max}}{\sqrt{3}}$, $H = \frac{2}{3}H_{0e}$. Если обозначить эти значения как Q_H и H_H , то (4) запишется в следующем виде:

$$H = 1,5H_H - \frac{1,5H_H}{(\sqrt{3}Q_H)^2} Q^2 = 1,5H_H - 0,5 \frac{H_H}{Q_H^2} Q^2 = K_H H_H - K_Q \frac{H_H}{Q_H^2} Q^2,$$

где K_H – коэффициент напора; H_H – номинальное значение напора; Q_H – номинальное значение расхода; K_Q – коэффициент расхода.

То есть в рассматриваемом случае $K_H = 1,5$ и $K_Q = 0,5$; если для реальной напорной характеристики известно значение $K_H \neq 1,5$, то значение коэффициента K_Q можно определить из соотношения:

$$K_H - K_Q = 1.$$

Теперь рассмотрим уравнение трубопроводной магистрали с учетом статического напора:

$$H_{\text{маг}} = H_c + (A_2/A_1) Q^2, \quad (5)$$

где H_c – статический напор в трубопроводной магистрали.

Коэффициент сопротивления магистрали A_2 может быть рассчитан по паспортным данным турбомеханизма для рабочей точки $H = H_H$ и $Q = Q_H$:

$$A_2 = \frac{A_1(H_H - H_c)}{Q_H^2}.$$

Если преобразовать уравнение (2) по Лапласу, то при использовании уравнения (2)–(5) можно получить модель турбомеханизма, показанную на рис. 2. Зададимся параметрами реального насоса и трубопроводной магистрали.

Технические и расчетные данные насоса и трубопроводной магистрали: тип насоса SA075T; $Q_H = 4680 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H_H = 9,8 \text{ м}$, $H_c = 0 \text{ м}$, $\omega_H = 293 \text{ 1/с}$, $d = 50 \text{ мм} = 0,05 \text{ м}$, $L = 10 \text{ м}$, $S = 0,0019625 \text{ м}^2$, $K = 177,5147 \text{ Па}\cdot\text{с}^2/\text{м}^6$, $K_1 = 1,4543 \text{ Па}\cdot\text{с}^2$, $A_1 = 19,625 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $A_2 = 11522,574 \text{ Па}\cdot\text{с}^2/\text{кг}\cdot\text{м}^3$.

На рис. 3 представлены естественная напорная характеристика насоса и характеристика трубопроводной магистрали, полученные с помощью графопостроителя.

Необходимо получить количественную оценку эксплуатационных и энергетических параметров технологического комплекса асинхронный двигатель–турбомеханизм–трубопроводная магистраль при управлении производительностью методом дросселирования, что и является нашей целью.

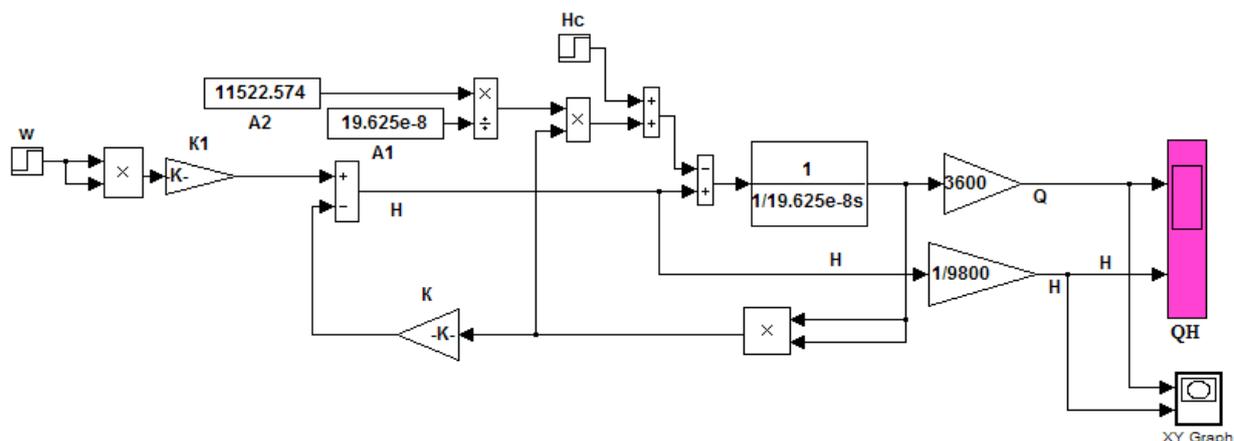


Рис. 2. Модель турбомеханизма с трубопроводной магистралью
Fig. 2. Model of a turbomechanism with a pipeline

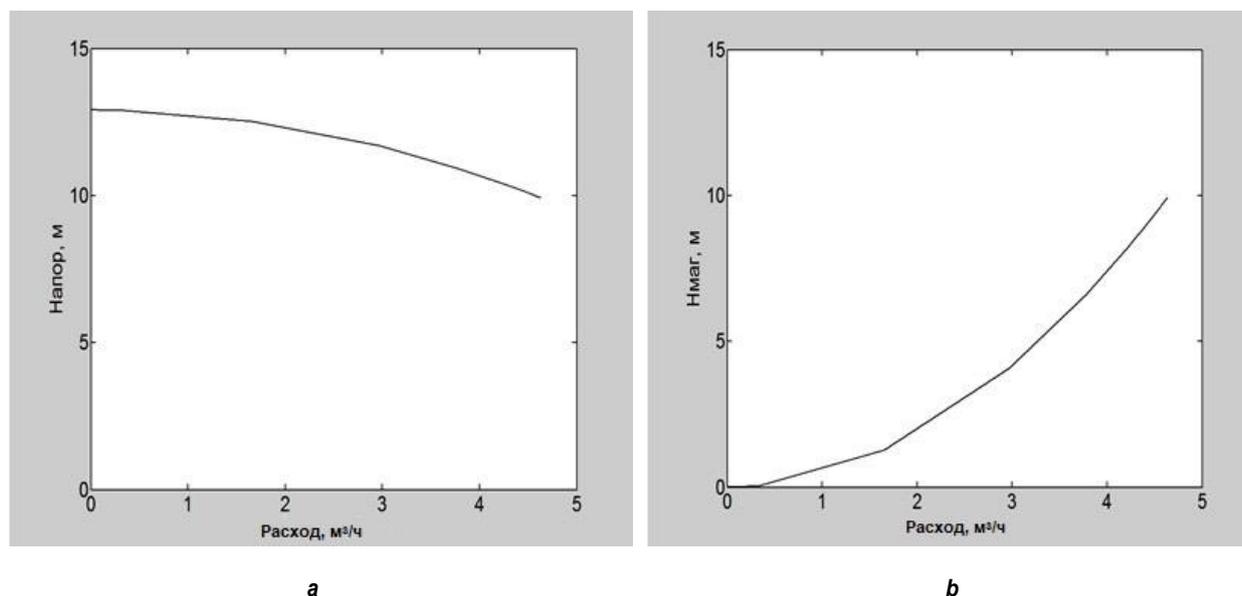


Рис. 3. Естественная напорная характеристика насоса (а) и характеристика трубопроводной магистрали (b)
Fig. 3. Natural head-capacity curve of the pump (a) and pipeline characteristic (b)

МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ–ТУРБОМЕХАНИЗМ–ТРУБОПРОВОДНАЯ МАГИСТРАЛЬ

Модель турбомеханизма может быть представлена структурой, показанной на рис. 4. Входным параметром модели является угловая скорость приводного двигателя, выходным параметром – расход насоса. Пропорциональный квадрату скорости сигнал сравнивается с сигналом внутренней обратной связи, пропорциональным квадрату расхода. Разность этих сигналов определяет величину напора механизма H , который сравнивается с напором в трубопроводной магистрали $H_{\text{маг}}$, разность этих сигналов подается на вход интегрирующего звена, учитывающего инерционность трубопроводной магистрали.

Отсюда следует, что аналогом вращающего момента M электропривода является напор H турбомеханизма, момент сил сопротивления M_C электропривода подобен сопротивлению трубопроводной магистрали $H_{\text{маг}}$, аналогом скорости вращения электропривода ω является расход Q турбомеханизма. Режимы работы турбомеханизмов (электроприводов) зависят от соотношения между скоростным напором H (движущим моментом M) и силами сопротивления трубопроводной магистрали $H_{\text{маг}}$ (моментом сил сопротивле-

ния M_C). Длительность механических переходных процессов электроприводов зависит от величины суммарного момента инерции, приведенного к валу двигателя J , для турбомеханизмов длительность этих переходных процессов зависит от длины и диаметра трубопроводной магистрали, а также плотности перемещаемой жидкости или газа.

Расчеты переходных процессов электроприводов можно проводить с помощью обобщенного графо-аналитического метода. Используя рассмотренные выше аналогии, можно применить графо-аналитический метод для расчета времени переходных процессов турбомеханизмов по расходу. Методика такого расчета заключается в следующем:

1. По паспортным данным строится естественная напорная характеристика турбомеханизма в первом квадранте системы координат $Q = f(H)$ (рис. 5).

2. Рассчитывается характеристика трубопроводной магистрали $H_{\text{маг}} = f(Q)$ и также строится в первом квадранте (см. рис. 5).

3. Уравнение (2) записывается в виде приращений:

$$\frac{\Delta Q}{H - H_{\text{МАГ}}} = A_1 \Delta t,$$

и выбирается интервал времени Δt .

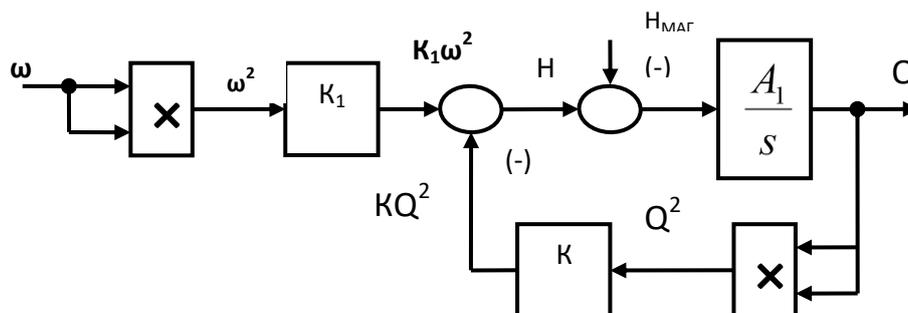


Рис. 4. Структурная схема модели турбомеханизма с трубопроводной магистралью
Fig. 4. Block diagram of a turbomechanism model with a pipeline

4. Рассчитывается тангенс основного угла построения:

$$\operatorname{tg} \alpha = A_1 \Delta t \frac{m_H}{m_Q},$$

где m_H и m_Q – масштабы напора и расхода, соответственно, используемые на рис. 5.

5. Из точки 1 под углом α строится луч до пересечения с характеристикой трубопроводной магистрали $H_{\text{Mag}} = f(Q)$ в точке 2. Значения расхода из этой точки сносятся во второй квадрант на вертикальную линию, соответствующую выбранному интервалу времени Δt .

6. Полученная точка 2'' соответствует

приращению скорости $\Delta\omega$ на первом интервале расчета. Далее из точки 2' под углом α строится луч до пересечения с характеристикой трубопроводной магистрали $H_{\text{Mag}} = f(Q)$ в точке 3 и построения повторяются.

7. Нарастание расхода заканчивается в точке пересечения напорной характеристики турбомеханизма с характеристикой трубопроводной магистрали. Угол α_i на последнем интервале может быть измерен, что позволит рассчитать время работы турбомеханизма на этом интервале:

$$\Delta t_i = \frac{\operatorname{tg} \alpha_i m_Q}{A_1 m_H}.$$

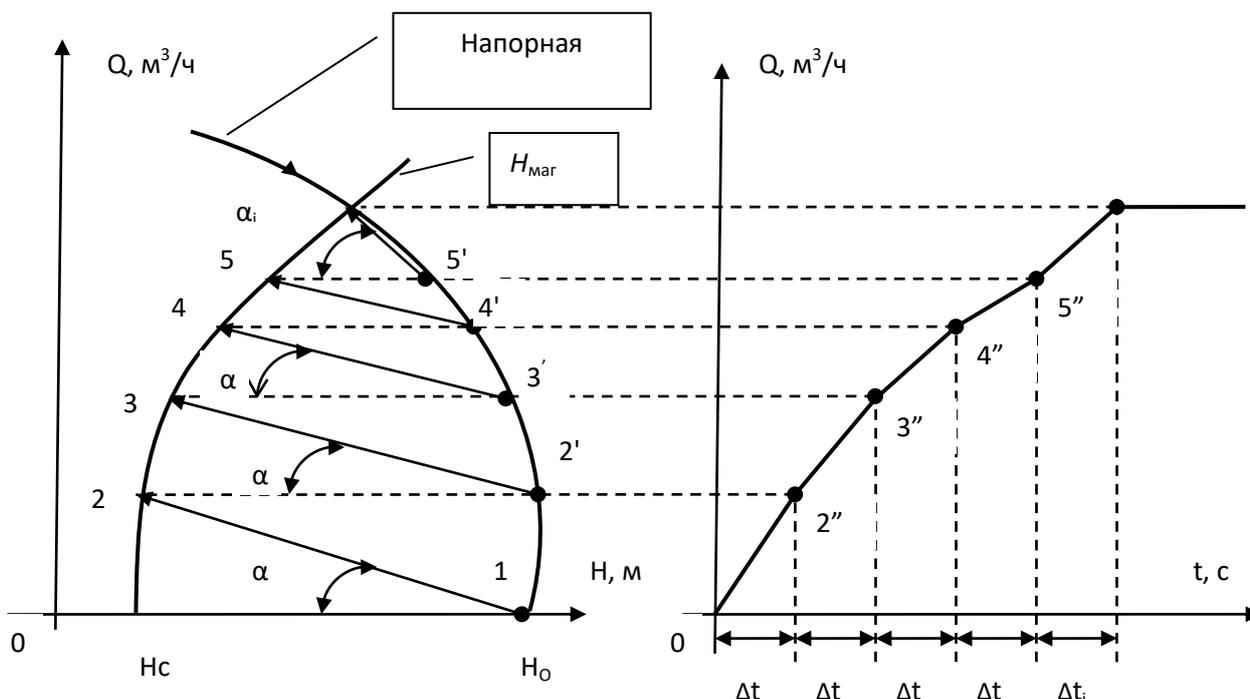


Рис. 5. Методика построения переходного процесса по расходу турбомеханизма
Fig. 5. Building methodology of a transient process of turbomechanism consumption

При учете электромагнитных процессов в электроприводах изменение тока во времени происходит не мгновенно, а с некоторым запаздыванием, обусловленным величиной электромагнитной инерции обмоток электрических машин.

В турбомеханизмах параметр скорости аналогичен (подобен) параметру тока и величина скорости изменяется не мгновенно, а с обусловленным механической и электромагнитной инерционностью привода запаздыванием.

Для учета этих особенностей работы турбомеханизмов расчетная математическая модель должна включать приводной двигатель.

Модель технологического комплекса асинхронный двигатель–турбомеханизм–трубопроводная магистраль для насоса SA075T показана на рис. 6. Модель содержит асинхронный двигатель типа 4A63B293 со следующими номинальными данными: $P_n = 0,55$ кВт; $U_n = 230/400$ В; $I_n = 3/1,5$ А; $n_n = 2850$ об/мин; $\eta_n = 0,73\%$; $\cos\phi_n = 0,98$; $R_s = 19,066$ Ом; $R_r = 14,079$ Ом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Были проанализированы полученные осциллограммы по различным параметрам электропривода и турбомеханизма при пуске и управлении производительностью насоса

методом дросселирования.

На рис. 7 показаны переходные процессы по расходу и напору насоса (а) и моменту и мощности сил сопротивления на валу асинхронного двигателя (b) при пуске и управлении производительностью насоса методом дросселирования.

Анализ полученных осциллограмм позволяет определить, что при увеличении коэффициента сопротивления магистрали A2:

- производительность (расход) насоса снижается непропорционально: при увеличении A2 в два раза расход уменьшается в 1,33 раза, в пять раз – в два раза, в 10 раз – в 2,8 раза, в 1000 раз – в 27,5 раза;

- напор насоса возрастает непропорционально: при увеличении A2 в два раза напор увеличивается в 1,14 раза, в пять раз – в 1,24 раза, в 10 раз – в 1,28 раза, в 1000 раз – в 1,33 раза;

- момент сил сопротивления на валу двигателя снижается непропорционально: при увеличении A2 в два раза момент уменьшается в 1,07 раза, в пять раз – в 1,16 раза, в 10 раз – в 1,23 раза, в 1000 раз – в 1,43 раза;

- мощность сил сопротивления на валу двигателя снижается непропорционально: при увеличении A2 в два раза мощность уменьшается в 1,07 раза, в пять раз – в 1,16 раза, в 10 раз – в 1,23 раза, в 1000 раз – в 1,42 раза.

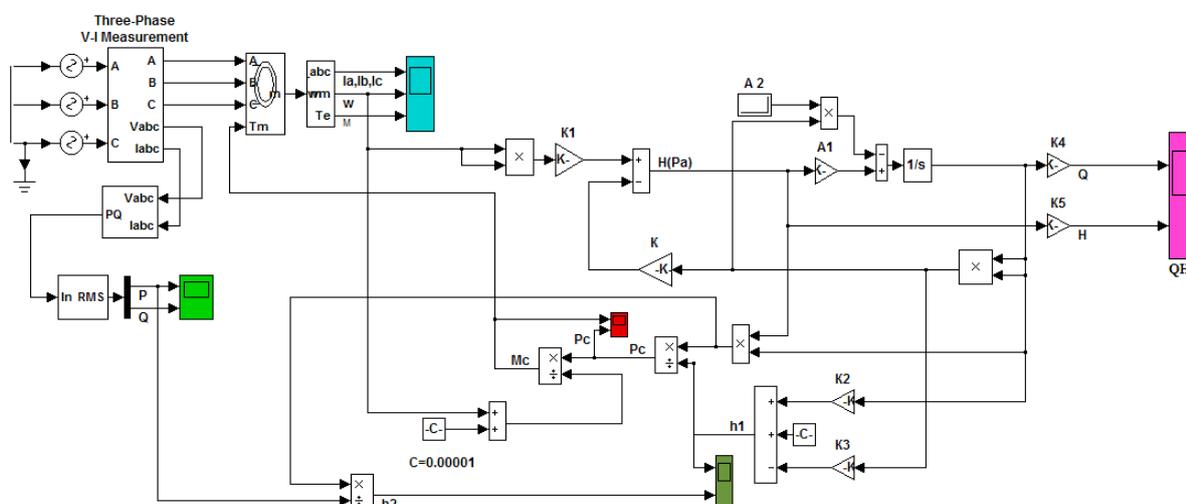


Рис. 6. Модель технологического комплекса асинхронный двигатель–насос–трубопроводная магистраль при управлении производительностью методом дросселирования

Fig. 6. Model of the technological complex induction motor–pump–pipeline under throttling control of pump performance

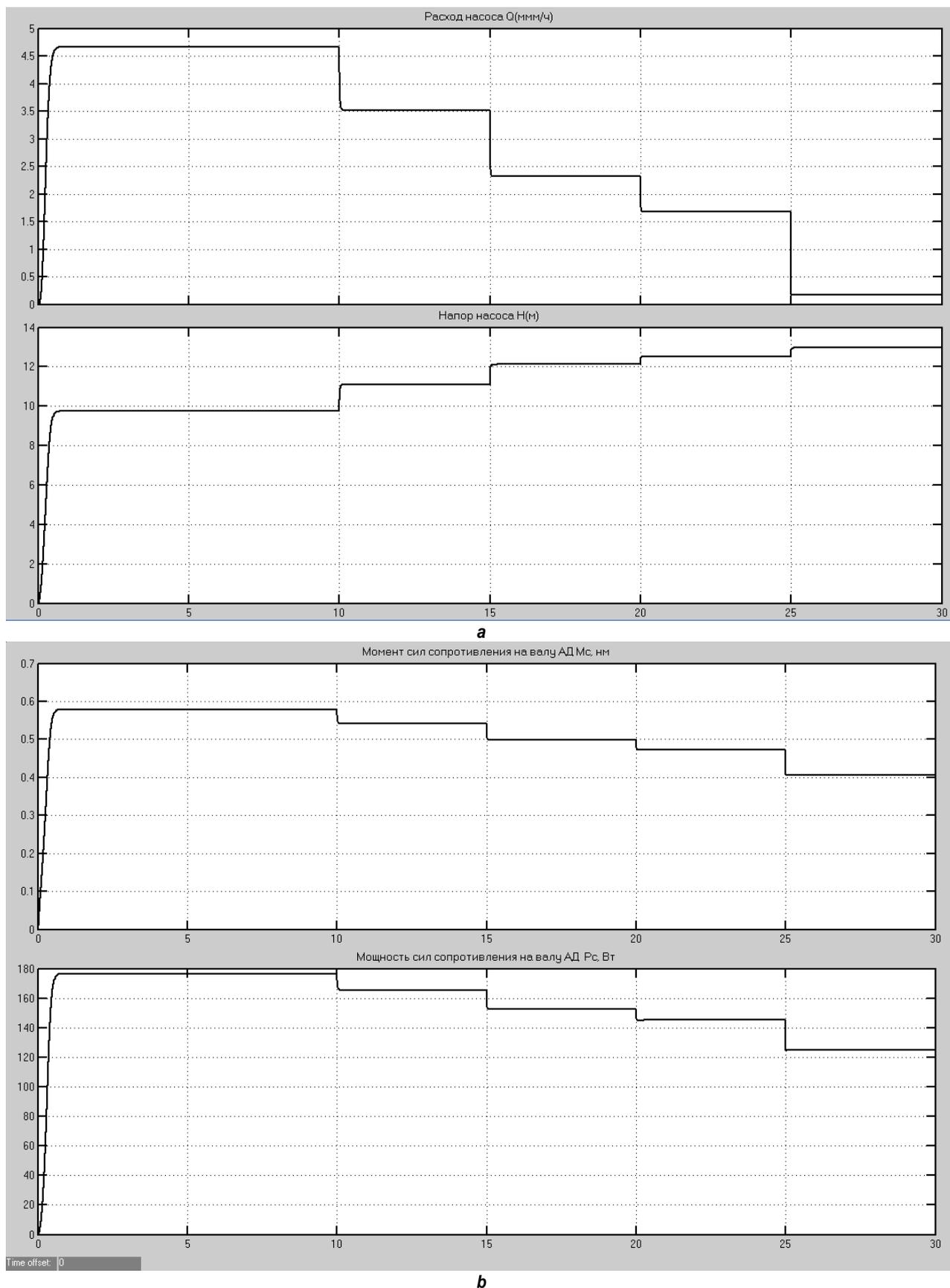


Рис. 7. Переходные процессы по расходу и напору насоса (а) и моменту и мощности сил сопротивления на валу асинхронного двигателя (b) при пуске и управлении производительностью насоса методом дросселирования
Fig. 7. Transients of pump flow and head (a), the moment and power of induction motor shaft resistance forces (b) when starting and controlling the pump performance by throttling

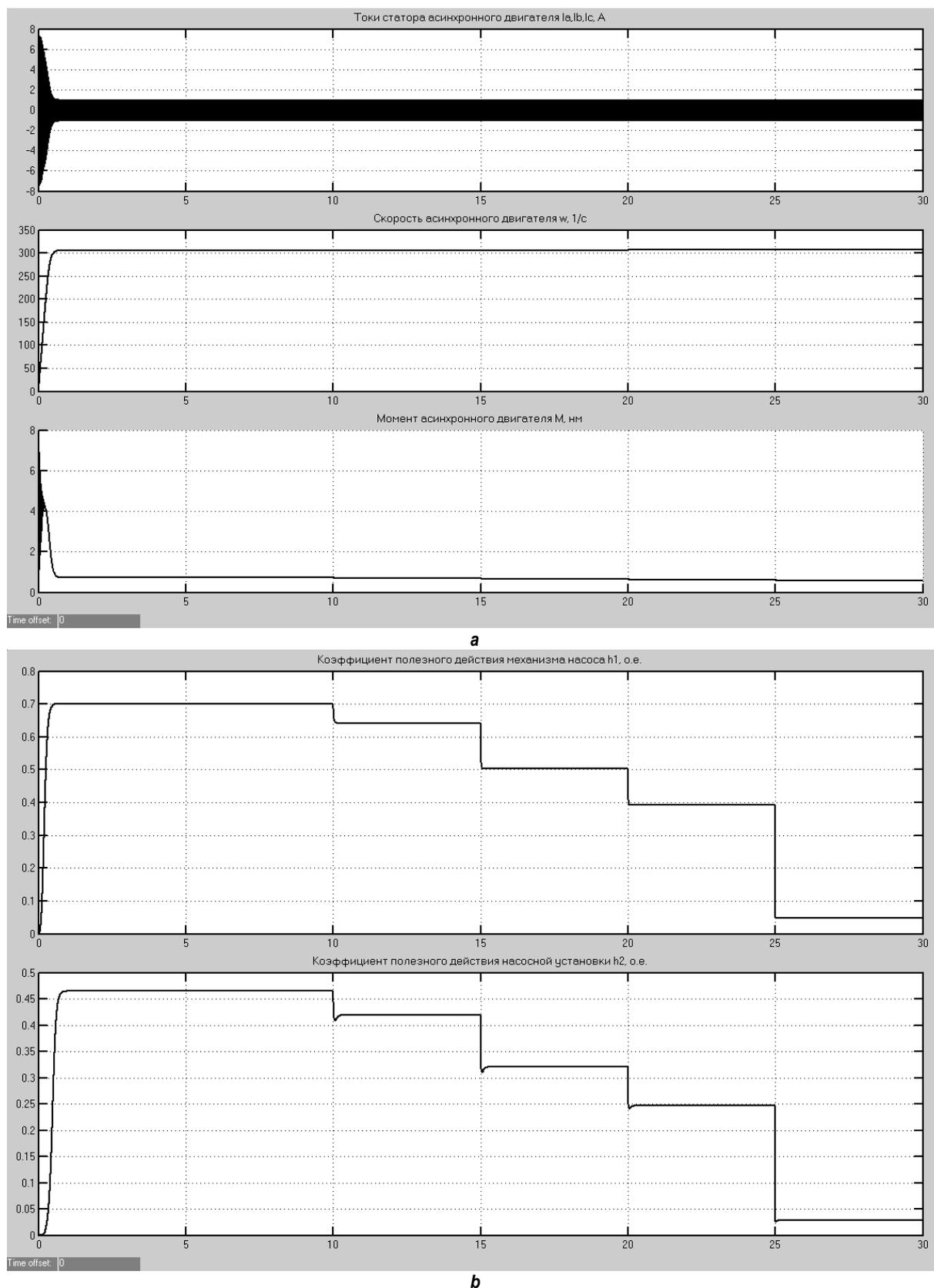


Рис. 8. Переходные процессы по току статора, угловой частоте вращения ω , моменту вращения M асинхронного двигателя (а) и коэффициентам полезного действия механизма насоса и всей насосной установки (b) при пуске и управлении производительностью насоса методом дросселирования
Fig. 8. Transients of the stator current, angular rotation frequency ω , torque M of the induction motor (a) and efficiency coefficients of the pump mechanism and entire pumping unit (b) when starting and controlling pump performance by throttling

На рис. 8 показаны переходные процессы по току статора, угловой частоте вращения ω , моменту вращения M асинхронного двигателя (а) и коэффициентам полезного действия механизма насоса и всей насосной установки (б) при пуске и управлении производительностью насоса методом дросселирования.

Время пуска двигателя насоса составляет 0,5 с, максимальный ток статора при пуске в 4,39 раза превышает номинальное значение, установившееся значение тока статора не более 59,3% от номинального.

Анализ полученных осциллограмм позволяет определить, что при увеличении коэффициента сопротивления магистрали A_2 :

- ток статора двигателя снижается незначительно: при увеличении A_2 в два раза ток уменьшается в 1,012 раза, в пять раз – в 1,026 раза, в 10 раз – в 1,034 раза, в 1000 раз – в 1,053 раза;

- скорость двигателя возрастает незначительно: при увеличении A_2 в два раза скорость увеличивается в 1,0016 раза, в пять раз – в 1,0034 раза, в 10 раз – в 1,0046 раза, в 1000 раз – в 1,0074 раза;

- момент двигателя снижается незначительно: при увеличении A_2 в два раза момент уменьшается в 1,052 раза, в пять раз – в 1,125 раза, в 10 раз – в 1,167 раза, в 1000 раз – в 1,306 раза;

- коэффициент полезного действия механизма насоса снижается непропорционально: при увеличении A_2 в два раза коэффициент полезного действия уменьшается в 1,09 раза, в пять раз – в 1,39 раза, в 10 раз – в 1,78 раза, в 1000 раз – в 14,5 раза;

- коэффициент полезного действия всей насосной установки (с учетом двигателя) снижается непропорционально: при увеличении A_2 в два раза коэффициент полезного действия уменьшается в 1,1 раза, в пять раз – в 1,45 раза, в 10 раз – в 1,89 раза, в 1000 раз – в 15,5 раза.

При сравнении полученных на моделях с характеристиками экспериментально снятыми на лабораторном стенде характеристик, было определено, что разработанные модели достоверно отображают физические процессы, происходящие в центробежном насо-

се SA075T, приводимом во вращение асинхронным двигателем типа 4A63B293.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность использовать при расчетах характеристик турбомеханизмов методик, полученных в теории электропривода. Аналогом вращающего момента M электропривода является напор H турбомеханизма, момент сил сопротивления M_C электропривода подобен сопротивлению трубопроводной магистрали $H_{МАГ}$, аналогом скорости вращения электропривода ω является расход Q турбомеханизма. Режимы работы турбомеханизмов (электроприводов) зависят от соотношения между скоростным напором H (движущим моментом M) и силами сопротивления трубопроводной магистрали $H_{МАГ}$ (моментом сил сопротивления M_C). Длительность механических переходных процессов электроприводов зависит от величины суммарного момента инерции, приведенного к валу двигателя J , для турбомеханизмов длительность этих переходных процессов зависит от длины и диаметра трубопроводной магистрали, а также плотности перемещаемой жидкости или газа. В работе представлен простой графоаналитический метод расчета переходных процессов пуска турбомеханизмов по известным статическим характеристикам.

Была разработана модель технологического комплекса асинхронный двигатель–турбомеханизм–трубопроводная магистраль для насоса SA075T.

Проведено сравнение переходных процессов по различным параметрам электропривода и турбомеханизма при пуске и управлении производительностью насоса методом дросселирования.

Исследования показали, что при увеличении коэффициента сопротивления магистрали A_2 в 10 раз производительность насоса снижается в 2,8 раза; напор возрастает в 1,28 раза; момент, ток статора и скорость асинхронного двигателя изменяются незначительно: момент и ток уменьшаются в 1,167 и 1,034 раза, а скорость возрастает в 1,0046 раза; коэффициенты полезного действия механизма насоса и всей насосной установки (с

учетом двигателя) снижаются в 1,78 и в 1,89 раза, соответственно.

Таким образом, разработанная математическая модель технологического комплекса асинхронный двигатель–турбомеханизм–трубопроводная магистраль для насоса позволяет получить количественные оценки эксплуатационных и энергетических параметров

установки при пуске и управлении производительностью насоса методом дросселирования.

Модель может быть использована для исследования работы электропривода и турбомеханизма при различных управляющих и возмущающих воздействиях в питающей сети и трубопроводной магистрали.

Список источников

1. Гоман В. В., Ошурбеков С. Х., Казакбаев В. М., Прахт В. А., Дмитриевский В. А. Сравнение энергопотребления различными электродвигателями, работающими в составе насосного агрегата // *Электротехника и электромеханика*. 2020. № 1. С. 16–24. <http://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.03>.
2. Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Ibrahim M., Oshurbekov S., Sarapulov S. Efficiency analysis of low electric power drives employing induction and synchronous reluctance motors in pump applications // *Energies*. 2019. Vol. 12. No. 6. P. 1144. <http://doi.org/10.3390/en12061144>.
3. Gevorkov L., Rassolkin A., Kallaste A., Vaimann T. Simulink based model of electric drive for throttle valve in pumping application // *19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. 2018. <http://doi.org/10.1109/EPE.2018.8395996>.
4. Tergemes K. T., Amanbek D. S., Maratova B. M., Zhauyt A. Control system improvement of the electric drive of the pumping unit for oil production // *XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED)*. 2021. <http://doi.org/10.1109/ACED50605.2021.9462275>.
5. Klovov O. A., Pushkina A. A. Modernization of the electric drive and automation system of the sewage pumping station // *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020. <http://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271382>.
6. Schmehl C., McKinley M., McBride W., Kavanaugh J., Paes R. Adjustable speed drive selection for electric submersible pumps // *IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (San Francisco, 8–10 September 2014)*. San Francisco: IEEE, 2014. P. 201–216. <http://doi.org/10.1109/PCIcon.2014.6961885>.
7. Liang Xiaodong, Ilochonwu O., Adedun R. Dynamic response of variable frequency drives in electrical submersible pump systems // *48th IEEE Industrial & Commercial Power Systems Conference*. 2012. <http://doi.org/10.1109/ICPS.2012.6229603>.
8. Rachev S., Ivanova G., Koeva D. Y. Vector control of pump unit electric drive with medium voltage induction motor // *12th Electrical Engineering Faculty Conference*. 2020. <http://doi.org/10.1109/BulEF51036.2020.9326032>.
9. Siro B., Săvulescu A., Ianache C. The simulation of crude oil extraction in Canadian pumping with the DTC electric drive in a wide range of operating frequencies // *10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence*. 2018. <http://doi.org/10.1109/ECAI.2018.8678975>.
10. Пантелеев В. И., Пахомов А. Н., Федоренко А. А. Математическое моделирование энерготехнологического комплекса «Питающая сеть – электропривод – насос – трубопровод» // *Электротехника*. 2020. № 10. С. 56–62.
11. Довганюк И. Я., Сокур П. В., Лазарев Г. Б. Особенности электромагнитных и электромеханических процессов пуска тягодутьевых механизмов мощных энергоблоков ТЭС // *Электрические станции*. 2020. № 9. С. 38–49. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2020.1070.9.005>.
12. Мирхаликова Д. С., Дадабаев Ш. Т. Исследование пусковых режимов асинхронного электропривода оросительной насосной станции при пониженном напряжении сети // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020. № 3. С. 303–309.
13. Дадабаев Ш. Т., Рахматов Х. А., Абдумаликов Б. А. Исследование технологических и переходных процессов электроприводов турбомеханизмов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 4. С. 256–262.
14. Крюков О. В. Пуск электроприводных газоперекачивающих агрегатов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2016. № 20. С. 62–83.
15. Tomov P., Aprahamyan B., Petrov K., Andreev P., Petkov P. Experimental survey and analysis on the impact of the commutation process on a positive displacement pump driven by an asynchronous electric motor // *16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems*. 2019. <http://doi.org/10.1109/ELMA.2019.8771523>.
16. Săvulescu, Siro B., Ianache C., Georgescu L. Simulation of the electric drive of a beam pumping unit and its comparative analysis for different operating frequencies // *6th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering*. 2019. <http://doi.org/10.1109/ISEEE48094.2019.9136112>.
17. Wang Po-Hao, Wen Tsrong-Yi. Effects of electrical driving mode on pressure and flow rate of wire-rod electrohydrodynamic pumps // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 10. No. 4. P. 621–625. <http://doi.org/10.1109/TCPMT.2020.2978305>.
18. Гонпе Г. Г., Павлов В. Е. Математические модели

динамических процессов технологического комплекса «электропривод – турбомеханизм – трубопроводная магистраль» при управлении его производительностью изменением скорости вращения электропривода // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 1. С. 121–125.

19. Гоппе Г. Г., Луконин А. А., Павлов В. Е. Управление соотношением топливо-воздух в котлоагрегатах ТЭС при регулировании производительности дутьевых

вентиляторов методом дросселирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 8. С. 156–165.

20. Гоппе Г. Г., Павлов В. Е. Исследование устойчивости работы технологического комплекса электропривод – турбомеханизм – трубопроводная магистраль // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 5. С. 150–158.

References

1. Goman V. V., Oshurbekov S. H., Kazakbaev V. M., Praht V. A., Dmitrievskij V. A. Comparison of energy consumption by various electric motors operating as a part of a pumping unit. *Elektrotehnika i elektromehhanika*. 2020;1:16-24. (In Russ.). <http://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.03>.
2. Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Ibrahim M., Oshurbekov S., Sarapulov S. Efficiency analysis of low electric power drives employing induction and synchronous reluctance motors in pump applications. *Energies*. 2019;12(6):1144. <http://doi.org/10.3390/en12061144>.
3. Gevorkov L., Rassolkin A., Kallaste A., Vaimann T. Simulink based model of electric drive for throttle valve in pumping application. In: *19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. 2018. <http://doi.org/10.1109/EPE.2018.8395996>.
4. Tergemes K. T., Amanbek D. S., Maratova B. M., Zhauyt A. Control system improvement of the electric drive of the pumping unit for oil production. In: *XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED)*. 2021. <http://doi.org/10.1109/ACED50605.2021.9462275>.
5. Klovov O. A., Pushkina A. A. Modernization of the electric drive and automation system of the sewage pumping station. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020. <http://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271382>.
6. Schmehl C., McKinley M., McBride W., Kavanaugh J., Paes R. Adjustable speed drive selection for electric submersible pumps. In: *IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference*. 8–10 September 2014, San Francisco. San Francisco: IEEE; 2014, p. 201-216. <http://doi.org/10.1109/PCIcon.2014.6961885>.
7. Liang Xiaodong, Ilochonwu O., Adedun R. Dynamic response of variable frequency drives in electrical submersible pump systems. In: *48th IEEE Industrial & Commercial Power Systems Conference*. 2012. <http://doi.org/10.1109/ICPS.2012.6229603>.
8. Rachev S., Ivanova G., Koeva D. Y. Vector control of pump unit electric drive with medium voltage induction motor. In: *12th Electrical Engineering Faculty Conference*. 2020. <http://doi.org/10.1109/BulEF51036.2020.9326032>.
9. Siro B., Săvulescu A., Ianache C. The simulation of crude oil extraction in Canadian pumping with the DTC electric drive in a wide range of operating frequencies. In: *10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence*. 2018. <http://doi.org/10.1109/ECAI.2018.8678975>.
10. Panteleev V. I., Pahomov A. N., Fedorenko A. A. Mathematical modeling of a power line-electric drive-pump-pipeline power technological complex. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*. 2020;10:56-62. (In Russ.).
11. Dovganyuk I. Ya., Sokur P. V., Lazarev G. B. Features of electromagnetic and electromechanical processes of starting traction mechanisms of powerful thermal power plant units. *Elektricheskie Stantsii = Power Technology and Engineering*. 2020;9:38-49. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2020.1070.9.005>.
12. Mirkhalikova D. S., Dadabaev Sh. T. Research of start-up modes of asynchronous electric drive of irrigating pump station at the reduced voltage of the network. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the Tula State University*. 2020;3:303-309. (In Russ.).
13. Dadabaev Sh. T., Rakhmatov Kh. A., Abdumalikov B. A. Research of technological and transition processes of electric drives of turbomechanisms. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the Tula State University*. 2017;4:256-262. (In Russ.).
14. Kryukov O. V. Start-up of electrodriving gas-compressor units. *Vestnik Permskogo nacional'nogo isledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya = Bulletin of Perm national research polytechnic university. Electrotechnics, informational technologies, control systems*. 2016;20:62-83. (In Russ.).
15. Tomov P., Aprahamyan B., Petrov K., Andreev P., Petkov P. Experimental survey and analysis on the impact of the commutation process on a positive displacement pump driven by an asynchronous electric motor. In: *16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems*. 2019. <http://doi.org/10.1109/ELMA.2019.8771523>.
16. Săvulescu, Siro B., Ianache C., Georgescu L. Simulation of the electric drive of a beam pumping unit and its comparative analysis for different operating frequencies. In: *6th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering*. 2019. <http://doi.org/10.1109/ISEEE48094.2019.9136112>.
17. Wang Po-Hao, Wen Tsrong-Yi. Effects of electrical driving mode on pressure and flow rate of wire-rod electrohydrodynamic pumps. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2020;10(4):621-625.

<http://doi.org/10.1109/TCPMT.2020.2978305>.

18. Goppe G. G., Pavlov V. E. Dynamic process mathematical models for a technological complex “Electric Drive – Turbo-mechanism – Pipeline” when controlling its performance by changing electric drive rotation speed. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;1:121-125. (In Russ.).

19. Goppe G. G., Lukonin A. A., Pavlov V. E. Fuel – air ratio control in CHP plant boiler units at forced flow fan

performance regulation by throttling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;8:156-165. (In Russ.).

20. Goppe G. G., Pavlov V. E. Study of operation stability of the technological complex: electric motor – turbomechanism – pipeline. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2012;5:150-158. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Павлов Владимир Евгеньевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электропривода
и электрического транспорта,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Критерии авторства

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 29.09.2021; одобрена после рецензирования 10.01.2022; принята к публикации 17.05.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir E. Pavlov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Electric Drive and Electric Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Authorship criteria

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Information about the article

The article was submitted 29.09.2021; approved after reviewing 10.01.2022; accepted for publication 17.05.2022.