

# ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНО- РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

В статье рассматривается построение имитационной модели электротехнического комплекса, включающего асинхронный электродвигатель с частотным регулированием, приводящим в движение центробежный насос. Станции перекачки жидкости на основе центробежных насосов с асинхронными электроприводами, управляемыми преобразователями частоты, широко применяются, что обуславливает актуальность работы. Получение динамических характеристик данных приводов дает возможность понять взаимосвязь распределения энергии, а также согласовать режимы работы его основных частей. С этой целью была разработана имитационная модель электропривода станции перекачки жидкости. Данная имитационная модель использовалась для проведения численных экспериментов системы, включающей в себя силовой канал электропривода, гидравлическую подсистему, а также систему управления. В качестве среды для моделирования использовался программный продукт Simintech. В работе получены переходные процессы координат электропривода при воздействии как со стороны гидравлической нагрузки, так и со стороны электропитания. Показано влияние гидравлического сопротивления напорного трубопровода и статического противодавления на механическую характеристику момента сопротивления электропривода в целом. Рассмотренный подход расчета характеристик позволяет оценить взаимовлияние координат различной физической природы установок центробежных насосов с асинхронным частотно-регулируемым электродвигателем друг на друга.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, трубопровод, центробежный насос, инвертор, переходные процессы.

**Введение.** Широкое применение электропривода центробежных насосов обуславливает большой интерес к исследованиям в области моделирования, учета режимных параметров, уточнения методик расчета турбомеханизмов с асинхронным частотно-регулируемым электроприводом. Такие комплексы имеют подсистемы различной физической природы [1, 2]. Часто при рассмотрении вопросов динамики и статики [3, 4] установок центробежных насосов с асинхронным двигателем и частотным преобразователем одну из подсистем значительно упрощают в силу разных причин [5, 6]. Так, например, в инженерных расчетах механическая характеристика сопротивления насоса представляется квадратичной зависимостью, при этом параметры и особенности работы насоса на гидравлическую нагрузку не учитываются вовсе.

Значительная часть установок по перекачке жидкости [7] работает на сеть со статическим напором или противодавлением, что влияет как на статические характеристики, так и на динамические характеристики электропривода в целом [8]. В статье приводится как методика расчета таких комплексов, так показано, на какие конкретно ха-

рактеристики влияют режимы работы гидравлической нагрузки насоса.

**Математическое описание.** Для описания электромагнитных процессов асинхронного электродвигателя принята модель с двойной беличьей клеткой в двухфазной системе координат, которая состоит из пяти дифференциальных уравнений электромагнитной подсистемы и одного алгебраического уравнения (1). Выбор данной модели обусловлен значительным повышением точности моделирования [9] для двигателей с мощностью выше 100 кВт.

Описание асинхронной машины с одной беличьей клеткой (1) приведено в [10]:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} = \vec{u}_S - R_S \vec{i}_S - j\omega_0 \bar{\Psi}_S \\ \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} = -R_R \vec{i}_R - j(\omega_0 - Z_p \omega) \bar{\Psi}_R \\ \bar{\Psi}_S = L_S \vec{i}_S + L_m \vec{i}_R \\ \bar{\Psi}_R = L_R \vec{i}_R + L_m \vec{i}_S \\ \bar{\Psi}_m = (\vec{i}_S + \vec{i}_R) L_m \\ T_E = k \operatorname{Mod}(\bar{\Psi}_i \times \vec{i}_k) \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\vec{u}_s$ ,  $\vec{i}_s$ ,  $\vec{\Psi}_s$ ,  $\vec{u}_R$ ,  $\vec{i}_R$ ,  $\vec{\Psi}_R$  — напряжение, ток и потокосцепление статора и ротора соответственно;  $\vec{\Psi}_m$  — потокосцепление ветви намагничивания;  $\omega$ ,  $\omega_0$  — частота вращения ротора и частота вращения системы координат;  $T_E$  — момент на валу машины.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} = \vec{u}_s - R_s \vec{i}_s - j\omega_0 \vec{\Psi}_s \\ \frac{d\vec{\Psi}_{R1}}{dt} = -R_{R1} \vec{i}_{R1} - j(\omega_0 - Z_p \omega) \vec{\Psi}_{R1} \\ \frac{d\vec{\Psi}_{R2}}{dt} = -R_{R2} \vec{i}_{R2} - j(\omega_0 - Z_p \omega) \vec{\Psi}_{R2} \\ \vec{\Psi}_s = L_s \vec{i}_s + L_m (\vec{i}_{R1} + \vec{i}_{R2}) \\ \vec{\Psi}_{R1} = L_{R1} \vec{i}_{R1} + L_m (\vec{i}_s + \vec{i}_{R2}) \\ \vec{\Psi}_{R2} = L_{R2} \vec{i}_{R2} + L_m (\vec{i}_s + \vec{i}_{R1}) \\ \vec{\Psi}_m = (\vec{i}_s + \vec{i}_{R1} + \vec{i}_{R2}) L_m \\ T_E = k_1 \text{Mod}(\vec{\Psi}_i \times \vec{i}_k) + k_2 \text{Mod}(\vec{\Psi}_j \times \vec{i}_n), \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $\vec{i}_{R1}$ ,  $\vec{i}_{R2}$ ,  $\vec{\Psi}_{R1}$ ,  $\vec{\Psi}_{R2}$  — токи, потокосцепления первой и второй ветвей схемы замещения ротора соответственно.

Уравнения описания электромагнитных процессов асинхронного электродвигателя с двойной беличьей клеткой можно получить из (1), добавив соответствующие соотношения для роторной цепи с двойной клеткой (2).

Исключив из (2)  $\vec{i}_{R1}$ ,  $\vec{i}_{R2}$ ,  $\vec{\Psi}_s$ , а также записав (2) для неподвижной системы с вещественной и мнимой осями  $\alpha$  и  $\beta$ , получим (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{Sa} = R_s i_{Sa} + k_{is} \frac{di_{Sa}}{dt} + k_{R2} \frac{d\psi_{R1\alpha}}{dt} + k_{R1} \frac{d\psi_{R2\alpha}}{dt} \\ u_{S\beta} = R_s i_{S\beta} + k_{is} \frac{di_{S\beta}}{dt} + k_{R2} \frac{d\psi_{R1\beta}}{dt} + k_{R1} \frac{d\psi_{R2\beta}}{dt} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} i_{Sa} + \frac{1}{T_{R1}} \psi_{R1\alpha} + \frac{d\psi_{R1\alpha}}{dt} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \psi_{R2\alpha} + Z_p \omega \psi_{R1\beta} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} i_{S\beta} + \frac{1}{T_{R1}} \psi_{R1\beta} + \frac{d\psi_{R1\beta}}{dt} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \psi_{R2\beta} - Z_p \omega \psi_{R1\alpha} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} i_{Sa} + \frac{1}{T_{R2}} \psi_{R1\alpha} + \frac{d\psi_{R1\alpha}}{dt} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \psi_{R1\alpha} + Z_p \omega \psi_{R2\beta} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} i_{S\beta} + \frac{1}{T_{R2}} \psi_{R1\beta} + \frac{d\psi_{R1\beta}}{dt} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \psi_{R1\beta} - Z_p \omega \psi_{R2\alpha} \\ T_E = \frac{3}{2} Z_p [k_{R2} (\psi_{R1\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R1\beta} i_{Sa}) + k_{R1} (\psi_{R2\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R2\beta} i_{Sa})], \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $k_{R1} = \frac{L_{R1} L_m - L_m^2}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}$ ,  $k_{R2} = \frac{L_{R2} L_m - L_m^2}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}$ ,  
 $\sigma = L_{R1} L_{R2} - L_m^2$ ,  $T_{R1} = \frac{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}{R_{R1} L_{R2}}$ ,  $T_{R2} = \frac{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}{R_{R2} L_{R1}}$ ,  
 $k_{is} = \frac{L_s L_{R1} L_{R2} - L_s L_m^2 - L_{R1} L_m^2 - L_{R2} L_m^2 + 2L_m^3}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}$ ;  
 $L_{R1}$ ,  $L_{R2}$ ,  $L_m$ ,  $R_{R1}$ ,  $R_{R2}$ ,  $R_s$  — параметры схемы замещения;

$i_{Sa}$ ,  $i_{S\beta}$  —  $\alpha\beta$  составляющие тока статора (А);  
 $\psi_{R1\alpha}$ ,  $\psi_{R1\beta}$ ,  $\psi_{R2\alpha}$ ,  $\psi_{R2\beta}$  —  $\alpha\beta$  составляющие потокосцепления ротора (В·с).

Вектор потокосцепления ротора, согласно (1) и (2), с учетом  $\vec{\Psi}_R = \vec{\Psi}_{R1\sigma} + \vec{\Psi}_m$ ,  $\vec{\Psi}_{R2} = \vec{\Psi}_{R2\alpha} + \vec{\Psi}_m$ , определяется как (4):

$$\begin{aligned} \vec{\Psi}_R &= \vec{\Psi}_{R\sigma} + \vec{\Psi}_m = \vec{\Psi}_{R1\sigma} + \vec{\Psi}_{R2\alpha} + \vec{\Psi}_m = \\ &= \vec{\Psi}_{R1\sigma} + \vec{\Psi}_m + \vec{\Psi}_{R2\alpha} + \vec{\Psi}_m - \vec{\Psi}_m = \\ &= \vec{\Psi}_{R1} + \vec{\Psi}_{R2} - \vec{\Psi}_m, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\vec{\Psi}_{R\sigma}$ ,  $\vec{\Psi}_{R1\sigma}$ ,  $\vec{\Psi}_{R2\alpha}$  — потокосцепления рассеивания ротора, первой и второй ветвей схемы замещения ротора соответственно.

Модуль потокосцепления ротора, согласно (4), определяется как (5):

$$\psi_R = \sqrt{(\psi_{R1\alpha} + \psi_{R2\alpha} - \psi_{m\alpha})^2 + (\psi_{R1\beta} + \psi_{R2\beta} - \psi_{m\beta})^2}, \quad (5)$$

где  $\psi_{m\alpha}$ ,  $\psi_{m\beta}$  —  $\alpha\beta$  составляющие главного потокосцепления (В·с).

Составляющие главного потокосцепления определяются, согласно (1), как (6):

$$\psi_{m\alpha(\beta)} = (i_{Sa(\beta)} + i_{R\alpha(\beta)}) L_m. \quad (6)$$

При этом  $i_{R\alpha(\beta)}$  —  $\alpha\beta$  составляющие обобщенного тока ротора, определяемые по выражению (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{R\alpha(\beta)} = i_{R1\alpha(\beta)} + i_{R2\alpha(\beta)} \\ \dot{i}_{R1\alpha(\beta)} = \frac{L_m \psi_{R2\alpha(\beta)} - L_m^2 i_{Sa(\beta)} - L_{R2} \psi_{R1\alpha(\beta)} + L_m L_{R2} i_{Sa(\beta)}}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2} \\ i_{R2\alpha(\beta)} = \frac{L_m \psi_{R1\alpha(\beta)} - L_m^2 i_{Sa(\beta)} - L_{R1} \psi_{R2\alpha(\beta)} + L_m L_{R1} i_{Sa(\beta)}}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2} \end{array} \right. \quad (7)$$

Механическая подсистема, связывающая механические координаты двигателя и насоса, может быть представлена системой (8):

$$\begin{cases} T_{p\Sigma} = (T_p + T_{p0}) \cdot \text{sign}(\omega) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{T_E - T_{p\Sigma}}{J_{\Sigma}} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases}, \quad (8)$$

где  $T_{p\Sigma}$  — суммарный момент сопротивления нагрузки (Н·м);

$T_p$ ,  $T_{p0}$  — момент сопротивления центробежного насоса при ненулевом расходе жидкости и момент сил трения (Н·м);

$\theta$  — угол поворота ротора (рад);

$J_{\Sigma}$  — суммарный момент инерции двигателя и центробежного насоса.

Центробежный насос нагнетающий давление в напорном трубопроводе параметризуется с помощью полинома второй степени (9) [11].

$$h = \frac{1}{g} \left( \frac{\omega_{nom}}{\omega} \right)^2 \left( \left( C_0 - C_1 q \left( \frac{\omega_{nom}}{\omega} \right) \right) - C_2 \left( q \left( \frac{\omega_{nom}}{\omega} \right) \right)^2 - C_3 \left( q_{nom} - q \left( \frac{\omega_{nom}}{\omega} \right) \right)^2 \right), \quad (9)$$

где  $h$  — мгновенное значение напора, развиваемого насосом (м);

$q$  — мгновенное значение расхода, развиваемого насосом ( $\text{м}^3/\text{с}$ );

$\omega$  — угловая скорость вращения вала насоса (рад/с);

$C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  — коэффициенты аппроксимации, определяемые по паспортным данным или экспериментальным путем.

Момент сопротивления, создаваемый насосом, определяется как (10):

$$T_L = \frac{\rho q \left( \frac{\omega_{nom}}{\omega} \right) \left( C_0 - C_1 q \left( \frac{\omega_{nom}}{\omega} \right) \right) \left( \frac{\omega_{nom}}{\omega} \right)^3}{\omega}, \quad (10)$$

где  $\rho$  — плотность перекачиваемой жидкости ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

**Имитационная модель.** Модель механической подсистемы в пакете Simintech [12] представлена на рис. 1. Входным воздействием на механическую подсистему является суммарный электромагнитный момент асинхронного двигателя  $T_E$ , а также момент сопротивления момента сопротивления центробежного насоса при ненулевом расходе жидкости. Для задания электромагнитного момента и момента сопротивления используются блоки задания момента **ИМ1** и **ИМ2**. Данные блоки соединяются с блоком задания момента инерции  $J$  посредством механической вращательной связи (**МВС**). Вывод значения текущей угловой скорости и угла поворота осуществляется с датчика угловой скорости (**ДСУ**). Таким образом, подсистема передает вращающий момент двигателя на центробежный насос, а момент сопротивления насоса передает на асинхронный электродвигатель и измерительную часть для представления результатов расчета.

Гидравлическая подсистема содержит центробежный насос с питающим трубопроводом,

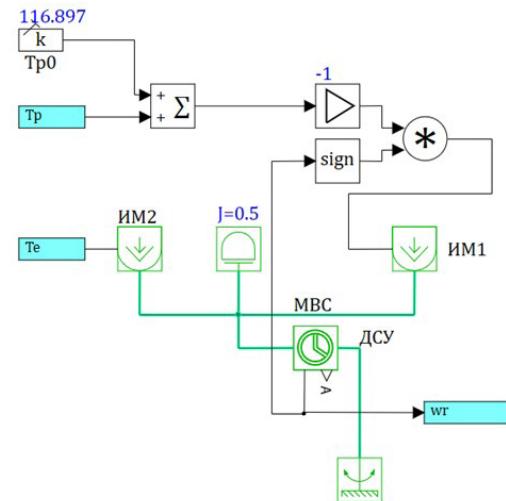


Рис. 1. Модель механической подсистемы

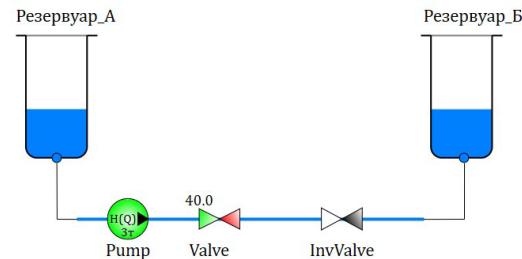


Рис. 2. Гидравлическая подсистема

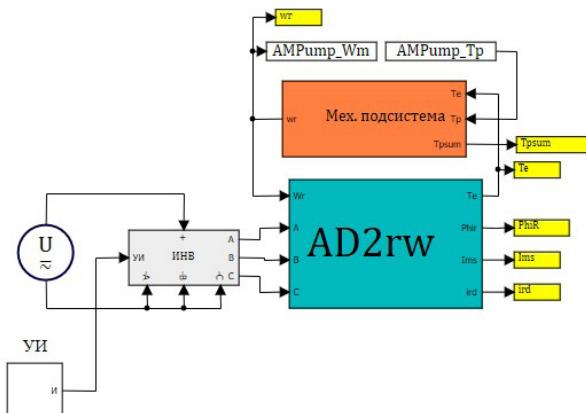


Рис. 3. Электромеханическая подсистема

подключенным к резервуару с водой, напорный трубопровод с обратным клапаном и задвижкой, подключенную к емкости, уровень жидкости в которой можно регулировать. Подсистема, приведенная на рис. 2, включает в себя подающий и напорный резервуары (**Резервуар\_A**, **резервуар\_Б**) с трубороводами к ним, центробежный насос (**Pump**), запорную арматуру (**Valve**) и обратный клапан (**InValve**). Свойства жидкости задаются в блоке **Резервуар\_A**. Давление в резервуаре не изменяется при изменениях объема перекачиваемой жидкости. Противодавление для насоса задается в блоке **Резервуар\_Б**. Геометрические параметры трубопровода, а также степень открытия задвижки **Valve** мо-

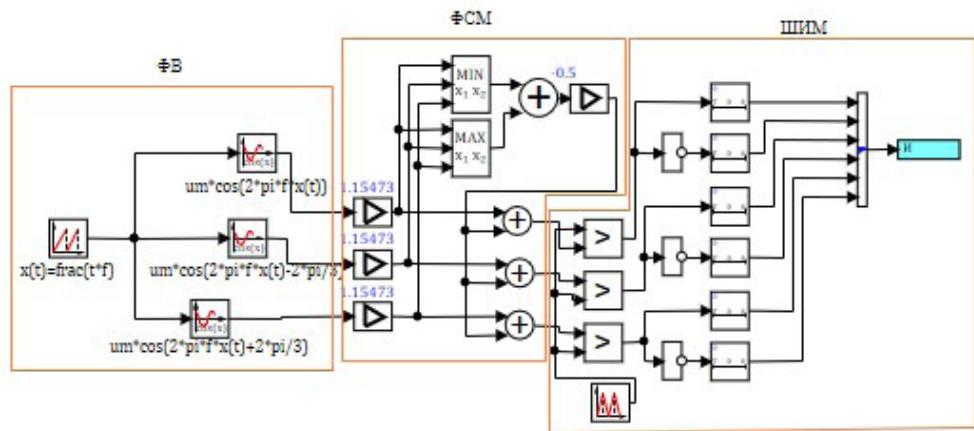


Рис. 4. Система управления инвертором

Таблица 1

Параметры модели электронасосного агрегата мощностью 200 кВт

$R_s$ , мОм	$R_{R1}$ , мОм	$R_{R2}$ , мОм	$L_m$ , мГн	$L_{s'}$ , мГн	$L_{R1}$ , мГн	$L_{R2}$ , мГн	$C_{0'}$ , Па/ (кг/м <sup>3</sup> )	$C_{1'}$ , Па/кг	$C_{2'}$ , МПа·с <sup>2</sup> / (кг/м <sup>3</sup> )	$C_{3'}$ , МПа·с <sup>2</sup> / (кг/м <sup>3</sup> )	$J_z$ , кг·м <sup>2</sup>
111	12,51	73,11	12,2	12,36	18,69	12,4	888251,2	2,507	0,6964	0,05	0,5

делируют локальные потери давления. Перекачивающаяся жидкость поступает в емкость (Резервуар\_Б) бесконечного объема. Для моделирования режимов работы установки с противодавлением необходимо указать уровень жидкости в ёмкости. Также можно указать избыточное давление в данном резервуаре. Сам трубопровод моделируется с помощью блока Канал, потери давления в котором определяются по закону Дарси.

Имитационная модель электромеханической подсистемы рис. 3. содержит трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором и двойной беличьей клеткой, получающий питание от трехфазного мостового инвертора. Управление трехфазным инвертором осуществляется с помощью ШИМ-модуляции. Модель системы управления инвертором представлена на рис. 4. Требуемая частота выходного напряжения инвертора, а также амплитуда этого напряжения задается блоком ФВ. ФВ формирует вектор задающего напряжения. Блок ШИМ формирует сигналы открытия транзисторов мостового инвертора напряжения ИНВ. Частота ШИМ составляет 2000 Гц. Регулирование частоты вращения ротора АД осуществляется скалярным способом, при  $U/f = \text{const}$ . Для более полного использования напряжения звена постоянного тока применяется блок формирователя способа модуляции ФСМ, который добавляет нулевую гармонику к прямой последовательности задающего вектора напряжения.

**Результаты моделирования.** Численные эксперименты проводились в среде Simintech для электронасосного агрегата мощностью 200 кВт, 3000 об/мин, производительность насоса составляет 200 кубических метров в час, номинальный напор 90 метров водяного столба.

Параметры модели электронасосного агрегата представлены в табл. 1.

Напряжение на входе инвертора составляет 535 В, силовые ключи приняты как идеальные. В процессе исследования рассматривалось поведение параметров состояния динамической системы

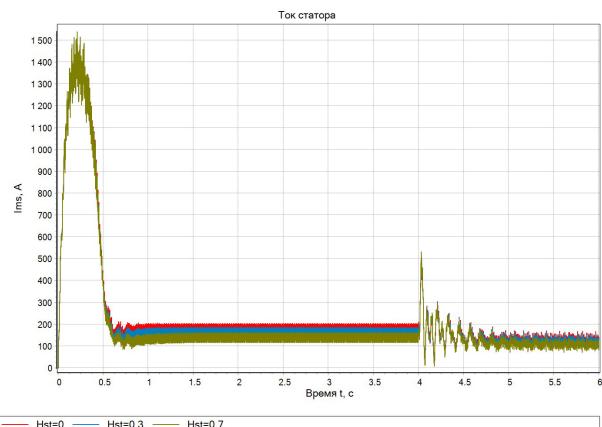


Рис. 5. График переходных процессов огибающей тока статора

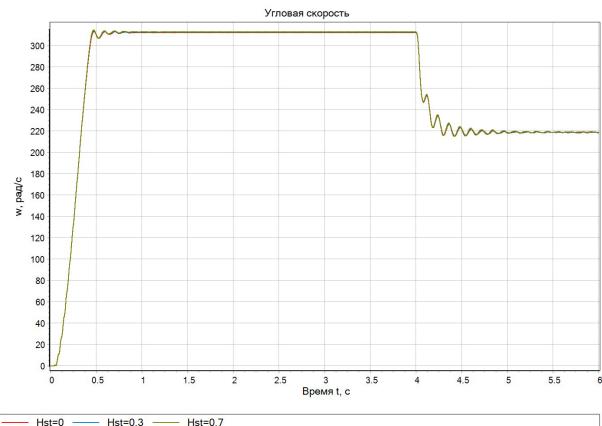


Рис. 6. График переходных процессов угловой скорости ротора асинхронного двигателя

при регулировании частоты и напряжения. Пуск электропривода осуществляется при частоте 50 Гц, в момент времени 2,5 секунды частота уменьшается

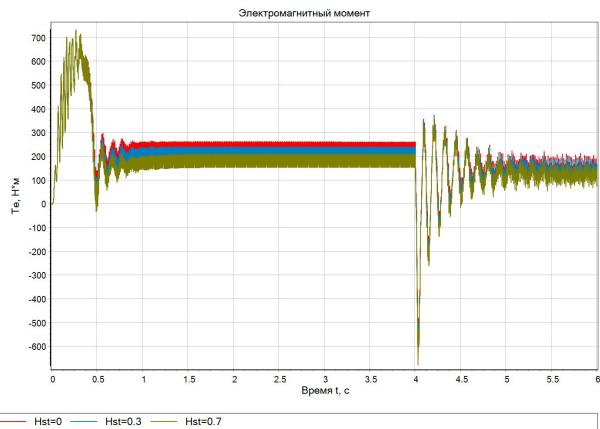


Рис. 7. График переходных процессов электромагнитного момента

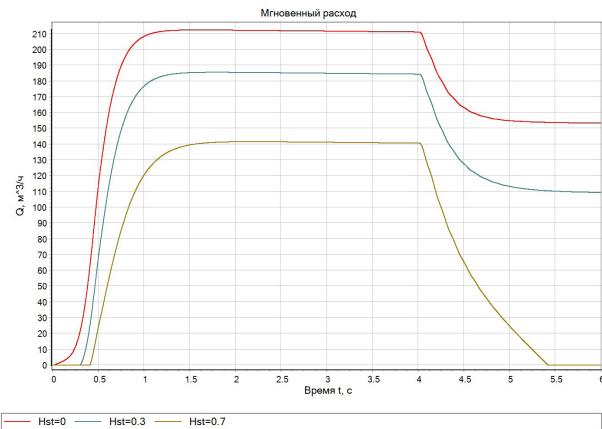


Рис. 10. График переходных процессов объемного расхода жидкости центробежного насоса (Q)

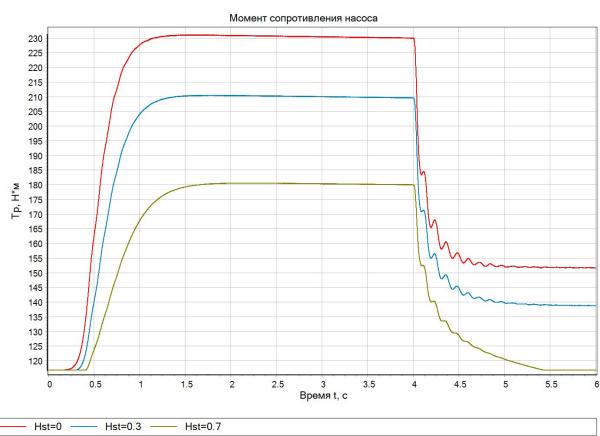


Рис. 8. График переходных процессов момента сопротивления насоса

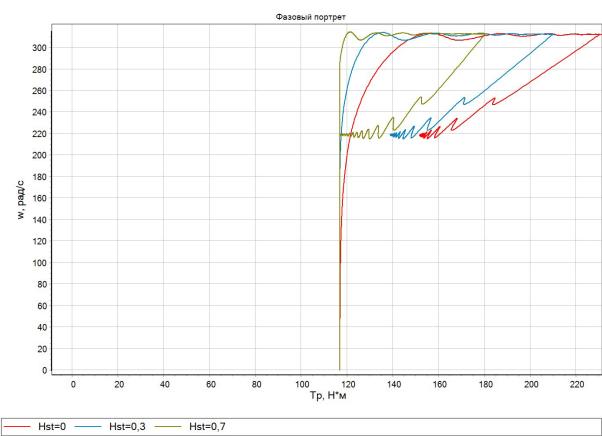


Рис. 11. Зависимость момента сопротивления от угловой скорости

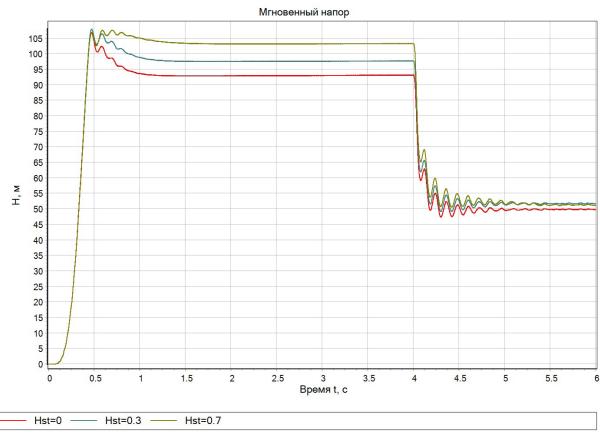


Рис. 9. График переходных процессов напора центробежного насоса (H)

до значения 35 Гц. Параметры переходного процесса определялись решателем обыкновенных дифференциальных уравнений Эйлера.

Результаты моделирования приведены на рис. 5–11. Для оценки влияния режимов работы напорного трубопровода с противодавлением на динамические характеристики, на рис. 5–11 приведены кривые без противодавления (индекс характеристики на  $Hst=0$ ), при статическом противодавлении 27 метров водяного столба (индекс характеристики  $Hst=0.3$ ) и статическом противодавлении

63 метра водяного столба (индекс характеристики  $Hst=0.7$ ).

В качестве перекачиваемой жидкости использовалась вода с объемным содержанием воздуха 0,005, температура воды 20 °C, плотность 997,8 (кг/м<sup>3</sup>). В системах со статическим давлением на напорном трубопроводе устанавливается обратный клапан для предотвращения обратного течения жидкости. Минимальное давление закрывания клапана принималось 0 Па, максимальное давление открытия 0,1·10<sup>5</sup> Па, постоянная времени открытия клапана составляет 1 с.

Параметры трубопровода круглого сечения принимались следующие: абсолютная шероховатость  $1 \cdot 10^{-5}$  м, длина трубопровода — 20 м.

#### Выводы.

Сравнивая динамические характеристики (рис. 5–11) при различных значениях противодавления, можно сделать следующие выводы:

- кривые тока статора (рис. 5) незначительно отличаются друг от друга по форме;
- при увеличении противодавления уменьшается электромагнитный момент асинхронного двигателя вследствие уменьшения момента нагрузки насоса (рис. 7, 8);
- резкое снижение амплитуды и частоты питающего напряжения приводит к переходу асинхронного двигателя в генераторный режим (рис. 6, 7);
- увеличение статического давления снижает мгновенный расход (рис. 10), что снижает потери

давления в трубопроводе, что, в свою очередь, увеличивает развиваемый напор (рис. 9);

— при значительном противодавлении (0,7 о.е. от номинального насоса), при понижении частоты питающего напряжения снижается развиваемый напор, и обратный клапан закрывается, что может характеризоваться временным обратным течением жидкости (рис. 10), асинхронный двигатель работает на момент трения насоса (рис. 11);

— увеличение статического давления приводит к переходу от квадратичного вида механической характеристики сопротивления к линейному, при этом уменьшается длина рабочего участка и увеличивается модуль жесткости характеристики (рис. 11).

В целом предложенная методика позволяет оценить взаимовлияние параметров различной физической природы установок центробежных насосов с асинхронным частотно-регулируемым электродвигателем друг на друга, а также режимов работы отдельных элементов на другие.

#### Библиографический список

1. Лезнов Б. С., Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуховодных установках. Москва: Энергоатомиздат, 2006. 359 с. ISBN 5-283-00806-1. EDN QNMGHF.
2. Букреев В. Г., Шандарова Е. Б., Быстров Е. А. [и др.]. Верификация модели прототипа асинхронного электропривода специального насосного агрегата // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2 (55). С. 25–31. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-25-31. EDN GYMNRA.
3. Гаврилов Д. П., Барабанов В. Г. Разработка и исследование системы управления насосной установкой // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2017. Т. 17, № 2. С. 11–19. DOI: 10.14529/engin170202. EDN YTPHWR.
4. Tecle S. I., Ziuzev A. M., Kostylev A. V. Improving sucker rod pump efficiency using frequency controlled induction motor // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2022. Vol. 333, no. 11. P. 140–148. DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3955. EDN EFKAYN.
5. Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод / под ред. И. Я. Браславского. Москва: Academia, 2004. 248 с. ISBN 5-7695-1704-2. EDN QMIONV.
6. Коржев А. А., Толстикова М. В., Ватлина А. М. Моделирование динамических процессов в системе электропривода

пульпонасоса при переменной концентрации перекачиваемой жидкости // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 2 (166). С. 12–19. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-12-19. EDN SSLZTR.

7. Ильинский Н. Ф., Москalenko В. В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. Москва: Издат. центр Академия, 2008. 553 с.

8. Еловик В. А., Войтов И. В., Седухо Ю. П. Расчет и анализ режимов работы центробежных насосов с частотно-регулируемым электроприводом: моногр. Минск: Изд-во БГТУ, 2022. 110 с. ISBN 978-985-897-023-9. EDN NXDWG.

9. Levi E. General method of magnetising flux saturation modelling in d-q axis models of double-cage induction machines // IEE Proceedings – Electric Power Applications. 1997. Vol. 144, Issue 2. P. 101–109. DOI: 10.1049/iee-apa:19970781.

10. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. Санкт-Петербург: Корона. Век, 2011. 368 с. ISBN 978-5-7931-0884-3.

11. Karasic I. J., Messina J. P., Cooper P., Heald C. C. Pump Handbook. 3rd ed. McGRAW-HILL New, 2001. 1790 p. ISBN 0-07-034032-3.

12. Хабаров С. П., Шилкина М. Л. Основы моделирования технических систем. Среда Simintech. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 120 с. ISBN 978-5-8114-3526-5. EDN NTKPGG.

**ЛЫСЕНКО Олег Александрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 4975-9193

AuthorID (РИНЦ): 643928

ORCID: 0000-0002-7924-5494

AuthorID (SCOPUS): 5650338820

ResearcherID: N-5528-2015

Адрес для переписки: deolas@mail.ru

#### Для цитирования

Лысенко О. А. Имитационное моделирование асинхронного частотно-регулируемого электропривода с учетом влияния гидравлической нагрузки центробежного насоса // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 84–91. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-84-91.

Статья поступила в редакцию 22.04.2023 г.

© О. А. Лысенко

# DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF HYDRAULIC LOAD OF CENTRIFUGAL PUMP ON COORDINATES OF ASYNCHRONOUS FREQUENCY- CONTROLLED ELECTRIC DRIVE

The article considers the construction of a simulation model of an electrical complex including an asynchronous electric motor with frequency regulation, driving a centrifugal pump. Fluid pumping stations based on centrifugal pumps with asynchronous electric drives controlled by frequency converters are widely used, which makes the work relevant. Obtaining the dynamic characteristics of these drives makes it possible to understand the relationship of energy distribution, as well as to coordinate the operating modes of its main parts. For this purpose, a simulation model of the electric drive of the liquid pumping station is developed. This simulation model is used to carry out numerical experiments of the system, which includes the power channel of the electric drive, as well as the control system. Simintech software product is used as a modeling environment. In the work, transient processes of the coordinates of the electric drive are obtained under the influence of both the hydraulic load and the power supply. The influence of the hydraulic resistance of the pressure pipeline and static back pressure on the mechanical characteristic of the moment of resistance of the electric drive as a whole is shown. The considered approach for calculating the characteristics makes it possible to evaluate the mutual influence of the coordinates of various physical nature of centrifugal pump installations with an asynchronous frequency-controlled electric motor on each other.

**Keywords:** asynchronous motor, pipeline, centrifugal pump, inverter, transients.

## References

1. Leznov B. S., Leznov B. S. Energosberezeniye i reguliruyemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh [Energy saving and variable drive in pump and blower installations]. Moscow, 2006. 359 p. ISBN 5-283-00806-1. EDN QNMGHF. (In Russ.).
2. Bukreyev V. G., Shandarova E. B., Bystrov E. A. [et al.]. Verifikatsiya modeli prototipa asinkhronnogo elektroprivoda spetsial'nogo nasosnogo agregata [Verification of induction motor drive prototype model for special pumping unit] // Elektrotekhnicheskiye sistemy i kompleksy. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2022. No. 2 (55). P. 25–31. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-25-31. EDN GYMNR. (In Russ.).
3. Gavrilov D. P., Barabanov V. G. Razrabotka i issledovaniye sistem upravleniya nasosnoy ustanovkoj [Development and study of control systems pumping unit] // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye. *Bulletin of the South Ural State University. Series Mechanical Engineering Industry*. 2017. Vol. 17, no. 2. P. 11–19. DOI: 10.14529/engin170202. EDN YTPHWR. (In Russ.).
4. Tecle S. I., Ziuzev A. M., Kostylev A. V. Improving sucker rod pump efficiency using frequency controlled induction motor // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. *Geo Assets Engineering*. 2022. Vol. 333, no. 11. P. 140–148. DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3955. EDN EFKAYN. (In Engl.).
5. Braslavskiy I. Ya., Ishmatov Z. Sh., Polyakov V. N. Energosberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod [Energy saving asynchronous electric drive] / ed. by I. Ya. Braslavskogo. Moscow, 2004. 248 p. ISBN 5-7695-1704-2. EDN QMIONV. (In Russ.).
6. Korzhev A. A., Tolstikova M. V., Vatlina A. M. Modelirovaniye dinamicheskikh protsessov v sisteme elektroprivoda pul'ponasosa pri peremennoy kontsentratsii perekachivayemoy zhidkosti [Simulation of dynamic processes in the electric drive system of the pulp pump with variable concentration of the pumped liquid] // Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2023. No. 2 (166). P. 12–19. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-12-19. EDN SSLZTR. (In Russ.).
7. Il'inskiy N. F., Moskalenko V. V. Elektroprivod: energo- i resursosberezeniye [Electric drive: saving energy and resource efficiency]. Moscow, 2008. 553 p. (In Russ.).
8. Elovik V. L., Voytov I. V., Sedlukho Yu. P. Raschet i analiz rezhimov raboty tsentrobrazhnykh nasosov s chastotno-reguliruyemym elektroprivodom [Calculation and analysis of centrifugal pumps with variable speed drive]. Minsk, 2022. 110 p. ISBN 978-985-897-023-9. EDN NXDWLG. (In Russ.).
9. Levi E. General method of magnetising flux saturation modelling in d-q axis models of double-cage induction machines // IEE Proceedings — Electric Power Applications. 1997. Vol. 144, Issue 2. P. 101–109. DOI: 10.1049/ip-epa:19970781. (In Engl.).

10. German-Galkin S. G. Matlab & Simulink. Proyektirovaniye mekhatronnykh sistem na PK [Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC]. St. Petersburg, 2011. 368 p. ISBN 978-5-7931-0884-3. (In Russ.).
11. Karasic I. J., Messina J. P., Cooper P., Heald C. C. Pump Handbook. 3rd ed. McGRAW-HILL New, 2001. 1790 p. ISBN 0-07-034032-3. (In Engl.).
12. Khabarov S. P., Shilkina M. L. Osnovy modelirovaniya tekhnicheskikh sistem. Sreda Simintech [Fundamentals of technical system modelling. Simintech environment]. St. Petersburg, 2019. 120 p. ISBN 978-5-8114-3526-5. EDN NTKPGG. (In Russ.).

---

**LYSENKO Oleg Aleksandrovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (Russia), Associate Professor of Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4975-9193  
AuthorID (RSCI): 643928  
ORCID: 0000-0002-7924-5494  
AuthorID (SCOPUS): 5650338820  
ReseearcherID: N-5528-2015  
Correspondence address: deolas@mail.ru

**For citations**

Lysenko O. A. Determination of the influence of hydraulic load of centrifugal pump on coordinates of asynchronous frequency-controlled electric drive // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 3 (187). P. 84 – 91. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-84-91.

Received April 22, 2023.

© O. A. Lysenko