

## НАБЛЮДАТЕЛЬ РАСХОДА ЖИДКОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Статья посвящена разработке системы идентификации объемной подачи жидкости в насосных установках. Актуальность работы обусловлена растущими требованиями к автоматизации управления насосными системами. Ключевым элементом системы является наблюдатель, который позволяет оценивать основные параметры работы установки, такие как скорость вращения насоса и момент сопротивления. Для электропривода насоса используется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, частота вращения которого регулируется. Давление в нагнетательном трубопроводе создается центробежным насосом. В основе наблюдателя лежит модель асинхронного двигателя в неподвижной системе координат, а для оценки скорости вращения и момента сопротивления насоса применяется наблюдатель Люенбергера. Для идентификации объемного расхода используется модель центробежного насоса, параметризованная полиномом второй степени. Авторы приводят результаты моделирования, показывающие высокую точность работы разработанного наблюдателя, с погрешностью не более 3 % в установившемся режиме. Полученные результаты демонстрируют эффективность предложенного подхода к построению системы мониторинга насосных установок.

**Ключевые слова:** идентификатор расхода, асинхронный электропривод, наблюдатель Люенбергера, центробежный насос, двойная беличья клетка ротора, насосная установка.

**Введение.** Регулируемый электропривод центробежных насосных установок имеет широкое применение в промышленности, добыче, транспорте жидкостей [1–4]. Увеличение степени автоматизации процессов перекачки жидкости требует измерения и определения большого числа параметров насосных установок [5]. Одним из таких важных параметров является мгновенный объемный расход или подача перекачиваемой жидкости. При этом прямое измерение расхода не всегда возможно по техноэкономическим и конструктивным решениям.

Прямое измерение объемного расхода насосной установки предполагает использование следующих основных способов [6]:

- ультразвуковой способ;
- электромагнитный способ;
- вихревой способ;
- массовый способ.

Ультразвуковой метод основан на использовании ультразвуковых волн для определения скорости потока жидкости в трубопроводе. В этом случае применяются ультразвуковые датчики, установленные на внешней стороне трубы, которые излучают и принимают ультразвуковые сигналы, распространяющиеся под углом к направлению потока. Измеряя разницу во времени прохождения сигнала по направлению и против направления потока, можно вычислить среднюю скорость потока, а затем, зная площадь поперечного сечения трубы,

определить объемный расход. Ультразвуковые расходомеры отличаются высокой точностью, широким диапазоном измерений и возможностью работы с различными типами жидкостей, включая коррозионно-активные и загрязненные. Они также не создают гидравлического сопротивления в трубопроводе и могут устанавливаться непосредственно на действующих трубопроводах.

Электромагнитный метод основан на использовании явления электромагнитной индукции. Принцип действия электромагнитного расходомера заключается в том, что при прохождении жидкости, являющейся электропроводящей средой, через магнитное поле, создаваемое электромагнитами, в жидкости возникает электрический ток, пропорциональный скорости потока. Измеряя разность потенциалов, возникающую между электродами, расположенными перпендикулярно направлению магнитного поля, можно определить объемный расход жидкости. Электромагнитные расходомеры отличаются высокой точностью, широким диапазоном измерений, не создают сопротивления потоку, а также могут работать с электропроводящими жидкостями, включая слабоминерализованные и загрязненные.

Вихревой метод основан на измерении частоты колебаний вихрей, возникающих за телом обтекания (например, за кольцевой перегородкой) при движении жидкости через трубопровод. Частота колебаний вихрей пропорциональна скорости по-

тока, а измеряя поперечное сечение трубопровода, можно рассчитать объемный расход. Вихревые расходомеры отличаются простотой конструкции, надежностью и устойчивостью к внешним воздействиям, а также возможностью работы с широким спектром жидкостей, включая пульпы, суспензии и жидкости с механическими примесями.

Массовый метод измерения расхода основан на прямом определении массы жидкости, протекающей через трубопровод за единицу времени. Это достигается с помощью массовых расходомеров, использующих принцип инерции движущейся жидкости или эффект Кориолиса. Массовые расходомеры отличаются высокой точностью, не зависят от физических свойств жидкости (плотность, вязкость) и позволяют определять не только объемный, но и массовый расход. Однако они, как правило, более дорогостоящие и сложные в конструкции по сравнению с другими типами расходомеров.

Помимо прямых методов измерения объемного расхода, таких как ультразвуковой, электромагнитный, вихревой и массовый, существуют и косвенные способы определения расхода жидкости. Эти методы основаны на измерении других параметров, связанных с расходом, и последующем пересчете объемного расхода. Один из косвенных способов — это измерение перепада давления на сужающем устройстве, установленном в трубопроводе. Принцип действия основан на законе Бернулли — при сужении потока скорость жидкости увеличивается, а давление уменьшается. Измерив перепад давления до и после сужающего устройства (например, диафрагмы или трубы Вентури), можно рассчитать объемный расход по калибровочной характеристике сужающего элемента. Данный метод прост, надежен и не требует специальных датчиков расхода, однако имеет ограниченный диапазон измерений и чувствителен к изменению свойств жидкости. Еще один косвенный способ — это измерение скорости потока с помощью трубки Пито. Данное устройство представляет собой  $L$ -образную трубку, один конец которой направлен навстречу потоку, а второй — параллельно ему. Разность давлений между этими концами пропорциональна квадрату скорости потока, что позволяет рассчитать объемный расход при известной площади поперечного сечения трубопровода. Трубки Пито отличаются простотой конструкции, низкой стоимостью и устойчивостью к загрязнениям, однако имеют ограниченный диапазон измерений и требуют тщательной установки. Также косвенное определение расхода возможно на основе измерения времени прохождения жидкости между двумя точками трубопровода. Для этого используются, например, времяпролетные расходомеры, в которых измеряется время распространения ультразвукового или электромагнитного сигнала между двумя датчиками, установленными на определенном расстоянии друг от друга. Зная это время и расстояние, можно вычислить среднюю скорость потока, а затем — объемный расход. Данный метод отличается высокой точностью, но требует более сложной аппаратуры и настройки.

Эффективное управление электроприводом часто предполагает необходимость получения информации о его механических координатах, таких как скорость вращения, угловое положение ротора, момент нагрузки и другие. Прямое измерение этих параметров с помощью датчиков связано с дополнительными затратами, усложнением конструкции и снижением надежности системы.

В связи с этим актуальной задачей является разработка методов оценки (наблюдения) механических координат электропривода на основе измерения электрических величин. Одним из наиболее распространенных типов электрических машин в промышленности является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Для решения задачи наблюдения механических координат асинхронных электроприводов широко используются методы, основанные на математических моделях этих машин. Среди них особое место занимает наблюдатель Люенбергера, который позволяет оценивать как электрические, так и механические параметры электропривода на основе измерения ограниченного числа доступных переменных.

В данной статье рассматривается косвенный способ определения объемного расхода жидкости насосной установки без противодавления с асинхронным электроприводом, через легкодоступные для прямого измерения координаты тока и напряжения. Данные координаты в электроприводах с частотным регулированием измеряются, в том числе для управления работой силовых преобразователей, в переходных и установившихся режимах [7–9].

Центробежный насос с асинхронным электроприводом представляет собой объект с несколькими физическими подсистемами: электрической, механической и гидравлической.

Электрическая подсистема представляет собой асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, получающий питание от источника трехфазного переменного напряжения. Асинхронный электродвигатель с двойной беличьей клеткой в неподвижной системе координат можно описать следующей системой (1):

$$\begin{cases} u_{S\alpha} = R_S i_{S\alpha} + k_{IS} \frac{di_{S\alpha}}{dt} + k_{R2} \frac{d\psi_{R1\alpha}}{dt} + k_{R1} \frac{d\psi_{R2\alpha}}{dt} \\ u_{S\beta} = R_S i_{S\beta} + k_{IS} \frac{di_{S\beta}}{dt} + k_{R2} \frac{d\psi_{R1\beta}}{dt} + k_{R1} \frac{d\psi_{R2\beta}}{dt} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} i_{S\alpha} + \frac{1}{T_{R1}} \psi_{R1\alpha} + \frac{d\psi_{R1\alpha}}{dt} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \psi_{R2\alpha} + Z_p \omega_m \psi_{R1\beta} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} i_{S\beta} + \frac{1}{T_{R1}} \psi_{R1\beta} + \frac{d\psi_{R1\beta}}{dt} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \psi_{R2\beta} - Z_p \omega_m \psi_{R1\alpha} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} i_{S\alpha} + \frac{1}{T_{R2}} \psi_{R2\alpha} + \frac{d\psi_{R2\alpha}}{dt} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \psi_{R1\alpha} + Z_p \omega_m \psi_{R2\beta} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} i_{S\beta} + \frac{1}{T_{R2}} \psi_{R2\beta} + \frac{d\psi_{R2\beta}}{dt} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \psi_{R1\beta} - Z_p \omega_m \psi_{R2\alpha} \\ T_E = \frac{3}{2} Z_p k_{R2} (\psi_{R1\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R1\beta} i_{S\alpha}) + \frac{3}{2} Z_p k_{R1} (\psi_{R2\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R2\beta} i_{S\alpha}) \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_E - T_L - T_0}{J} \end{cases} \quad (1)$$

где  $u_{S\alpha}$ ,  $u_{S\beta}$ ,  $i_{S\alpha}$ ,  $i_{S\beta}$ ,  $\psi_{R1\alpha}$ ,  $\psi_{R1\beta}$ ,  $\psi_{R2\alpha}$ ,  $\psi_{R2\beta}$  — пространственные составляющие вектора напряжения, тока и потокосцепления ротора соответственно;

$\omega_m$  — частота вращения ротора;

$J$  — суммарный момент инерции;

$T_E$  — электромагнитный момент, развиваемый асинхронной машиной;

$T_L$  — момент нагрузки центробежного насоса;

$T_0$  — момент трения.

Механическая подсистема связывает координаты гидравлической и электрической подсистем между собой.

Гидравлическая подсистема состоит из насоса, создающего давление, и трубопровода, подключён-

ного к напорному патрубку. При этом насос работает на гидравлическую сеть без противодействия. Потребляемая мощность на валу насоса определяется как полином второй степени (2):

$$N_{meh} = \left( \frac{\omega_{nom}}{\omega_m} \right)^3 (A_0 - A_1 q - A_2 q^2), \quad (2)$$

где  $N_{meh}$  — мощность, потребляемая насосом;  
 $q$  — мгновенное значение расхода, развиваемого насосом ( $m^3/c$ );

$A_0, A_1, A_2$  — коэффициенты аппроксимации полинома второй степени.

Момент нагрузки, создаваемый насосом, тогда определится как (3):

$$T_L = \frac{N_{meh}}{\omega_m}. \quad (3)$$

Используя выражения (2) и (3), получим связь функции расхода с моментом нагрузки (4):

$$T_L = \frac{\left( \frac{\omega_{nom}}{\omega_m} \right)^3 (A_0 - A_1 q - A_2 q^2)}{\omega}. \quad (4)$$

Решив уравнение (4) относительно  $q$ , получим два корня (5):

$$q_{1,2} = \frac{- \left( A_1 \omega_m \pm \sqrt{A_1^2 \omega_m^2 + 4A_2 T_L \omega_{nom}^3 - 4A_0 A_2 \omega_m^2} \right)}{2A_2 \omega_m}. \quad (5)$$

Для определения значений момента нагрузки насоса и скорости вращения ротора применим наблюдатель Люенбергера [10–12] к математическому описанию асинхронной машины (1). Наблюдаемые величины в системе (1) являются ток статора асинхронной машины и напряжение питания. С учетом этого получим систему (6):

$$\begin{cases} u_{S\alpha} = R_S \hat{i}_{S\alpha} + k_{iS} \frac{d\hat{i}_{S\alpha}}{dt} + k_{R2} \frac{d\hat{\psi}_{R1\alpha}}{dt} + k_{R1} \frac{d\hat{\psi}_{R2\alpha}}{dt} + k_{Ls} \Delta \hat{i}_{S\alpha} \\ u_{S\beta} = R_S \hat{i}_{S\beta} + k_{iS} \frac{d\hat{i}_{S\beta}}{dt} + k_{R2} \frac{d\hat{\psi}_{R1\beta}}{dt} + k_{R1} \frac{d\hat{\psi}_{R2\beta}}{dt} + k_{Ls} \Delta \hat{i}_{S\beta} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} \hat{i}_{S\alpha} + \frac{1}{T_{R1}} \hat{\psi}_{R1\alpha} + \frac{d\hat{\psi}_{R1\alpha}}{dt} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \hat{\psi}_{R2\alpha} + Z_p \hat{\omega}_m \hat{\psi}_{R1\beta} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} \hat{i}_{S\beta} + \frac{1}{T_{R1}} \hat{\psi}_{R1\beta} + \frac{d\hat{\psi}_{R1\beta}}{dt} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \hat{\psi}_{R2\beta} - Z_p \hat{\omega}_m \hat{\psi}_{R1\alpha} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} \hat{i}_{S\alpha} + \frac{1}{T_{R2}} \hat{\psi}_{R2\alpha} + \frac{d\hat{\psi}_{R2\alpha}}{dt} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \hat{\psi}_{R1\alpha} + Z_p \hat{\omega}_m \hat{\psi}_{R2\beta} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} \hat{i}_{S\beta} + \frac{1}{T_{R2}} \hat{\psi}_{R2\beta} + \frac{d\hat{\psi}_{R2\beta}}{dt} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \hat{\psi}_{R1\beta} - Z_p \hat{\omega}_m \hat{\psi}_{R2\alpha} \end{cases} \quad (6)$$

где  $\hat{\omega}_m$  — оценка угловой скорости,  
 $\hat{i}_{S\alpha}, \hat{i}_{S\beta}, \hat{\psi}_{R1\alpha}, \hat{\psi}_{R1\beta}, \hat{\psi}_{R2\alpha}, \hat{\psi}_{R2\beta}$  — оценки проекций пространственных векторов тока статора и потоков сцеплений ротора соответственно;

$\Delta \hat{i}_{S\alpha} = \hat{i}_{S\alpha} - \hat{i}_{S\alpha}; \Delta \hat{i}_{S\beta} = \hat{i}_{S\beta} - \hat{i}_{S\beta}$  — невязки токов статора;

$k_{Ls}$  — коэффициент усиления невязок тока.

Наблюдатель момента нагрузки представляет собой алгебраическую сумму пропорциональной и интегральной и дифференциальной составляющих

произведений невязок тока и соответствующих составляющих потокосцеплений ротора (7).

$$\begin{cases} \hat{T}_E = \frac{3}{2} Z_p k_{R2} (\hat{\psi}_{R1\alpha} \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \hat{i}_{S\alpha}) + \frac{3}{2} p_p k_{R1} (\hat{\psi}_{R2\alpha} \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \hat{i}_{S\alpha}) \\ T_{LP} = K_{Tmp} [k_{R2} (\hat{\psi}_{R1\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha}) + k_{R1} (\hat{\psi}_{R2\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha})] \\ T_{LI} = \frac{K_{Tmi}}{p} [k_{R2} (\hat{\psi}_{R1\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha}) + k_{R1} (\hat{\psi}_{R2\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha})] \\ T_{LD} = p K_{Tmd} [k_{R2} (\hat{\psi}_{R1\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha}) + k_{R1} (\hat{\psi}_{R2\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha})] \\ \hat{T}_L = \frac{3}{2} Z_p (T_{LP} + T_{LI} + T_{LD}) \\ \hat{\omega}_m = \frac{\hat{T}_E - \hat{T}_L}{Jp} \end{cases} \quad (7)$$

где  $\hat{T}_L$  — оцененные значения момента нагрузки насоса.

Структурная схема, реализующая уравнения (6, 7), представлена на рис. 1.

Наблюдаемый объемный расход с учетом (5, 7) тогда можно записать как (8):

$$\hat{q} = \frac{-A_1 \hat{\omega}_m \pm \sqrt{A_1^2 \hat{\omega}_m^2 + 4A_2 (\hat{T}_L - T_0) \omega_{nom}^3 - 4A_0 A_2 \hat{\omega}_m^2}}{2A_2 \hat{\omega}_m}. \quad (8)$$

Для уменьшения пульсаций наблюдаемого расхода в качестве фильтра было применено аperiодическое звено. С учетом этого выражение (8) можно представить в следующем виде (9):

$$\hat{q} = \frac{1}{T_q p + 1} \frac{-A_1 \hat{\omega}_m \pm \sqrt{A_1^2 \hat{\omega}_m^2 + 4A_2 (\hat{T}_L - T_0) \omega_{nom}^3 - 4A_0 A_2 \hat{\omega}_m^2}}{2A_2 \hat{\omega}_m}, \quad (9)$$

где  $T_q$  — постоянная времени фильтра.

**Имитационное моделирование.** Для исследования режимов работы наблюдателя в среде Simintech были использованы имитационные модели (рис. 1–3). В качестве примера насосной установки был использован насосный агрегат мощностью 90 кВт и производительностью 200  $m^3/ч$ . Математическое описание моделей соответствует системам дифференциальных уравнений (1–6).

Имитационная модель гидравлической подсистемы представлена на рис. 2. Структура имитационной модели, содержащая электрическую (AD2C) и механическую подсистемы, а также наблюдатель механических координат (HMK) и наблюдатель напора, представлены (Qobs) на рис. 3. Структура наблюдателя механических координат асинхронного электродвигателя с двойной беличьей клеткой в операторной форме представлена на рис. 1.

Поведение наблюдателя и всей динамической системы исследовалось при изменении частоты питающего напряжения и гидравлического сопротивления системы. Временные диаграммы изменения частоты питающего напряжения и гидравлической проводимости приведены на рис. 4. Доступный прямому измерению ток статора в виде действующего значения совместно с током ротора представлен на рис. 5. За эталонные значения были приняты выходные координаты модели электропривода при внешних возмущениях: угловая скорость, момент нагрузки, объемный расход ( $w, Tl, Q$  соответственно на рис. 6–8). Наблюдаемые значения координат угловой скорости ротора, момента нагрузки двига-

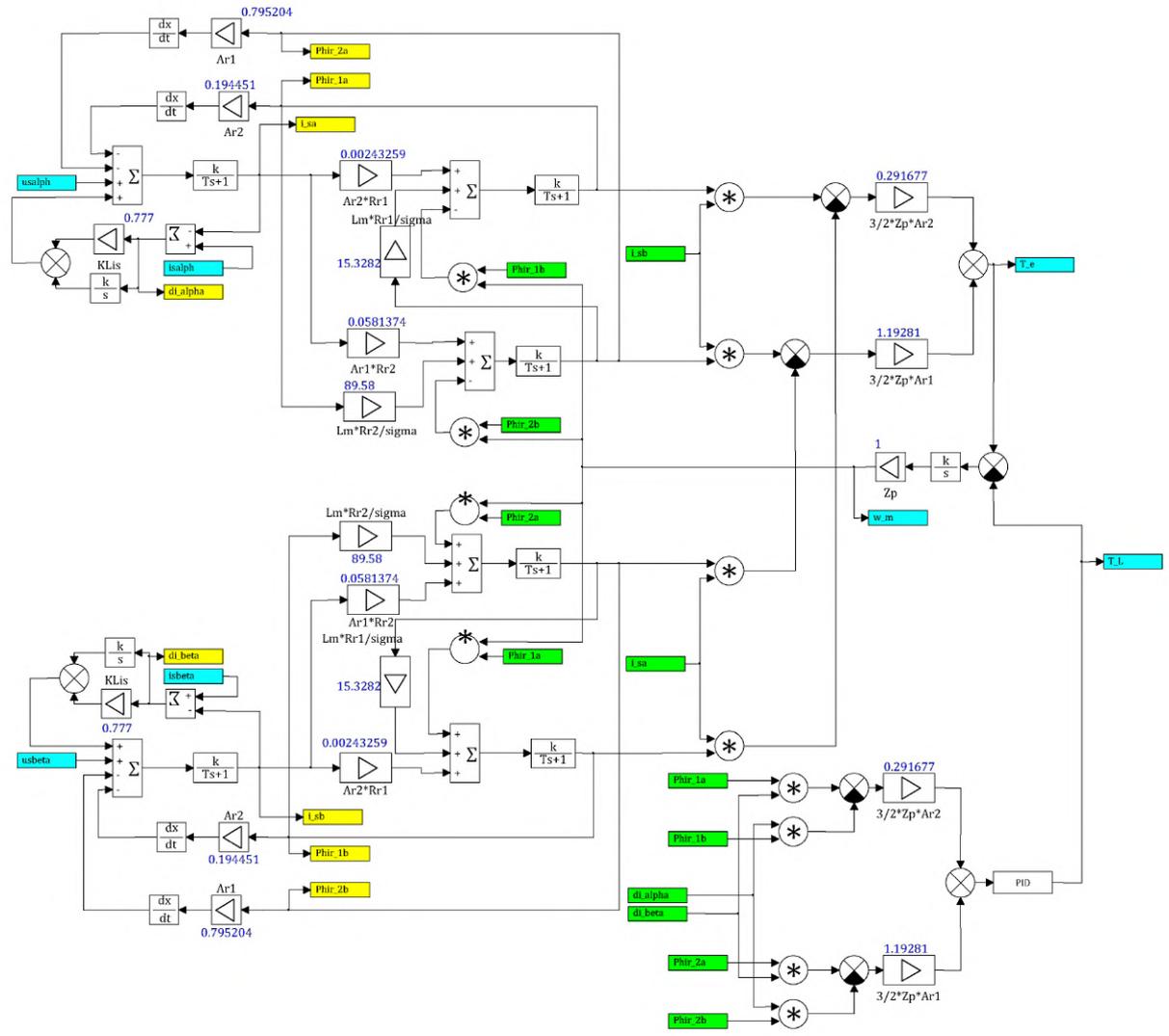


Рис. 1. Структурная схема наблюдателя механических координат

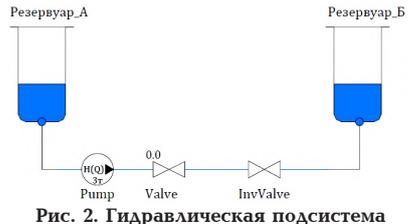


Рис. 2. Гидравлическая подсистема

теля и расхода насоса, также представлены на рис. 6–8 с обозначениями  $w^{\wedge}$ ,  $T_I^{\wedge}$  и  $Q^{\wedge}$  соответственно.

**Выводы.** Проанализировав данные представленные на рис. 5–8, очевидно, что предложенный наблюдатель объемного расхода обладает устойчивостью в динамических режимах работы. Кривые тока статора и ротора представленные на рис. 5, показывают достаточно сильные динамические колебания при внешнем возмущении. Угловая ско-

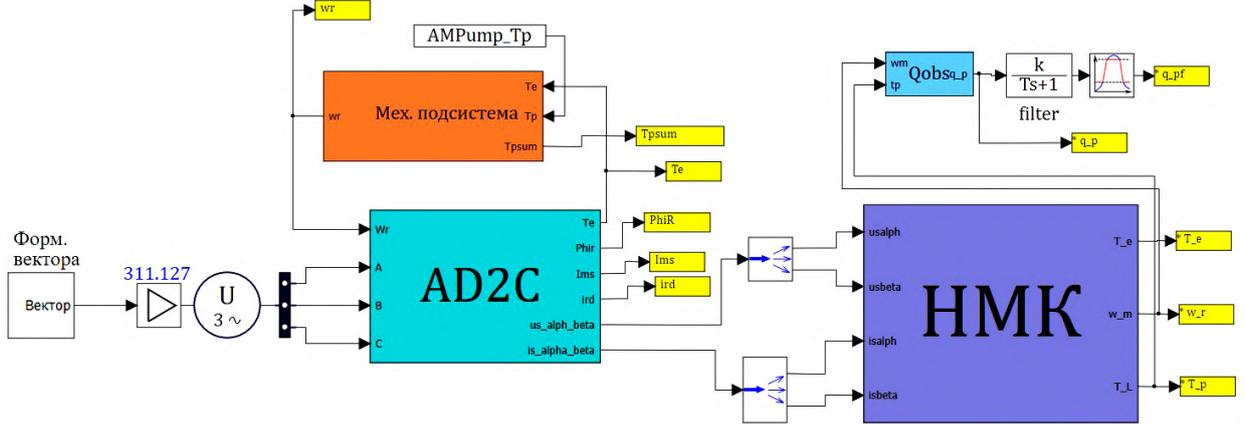


Рис. 3. Имитационная модель для испытания наблюдателя объемного расхода

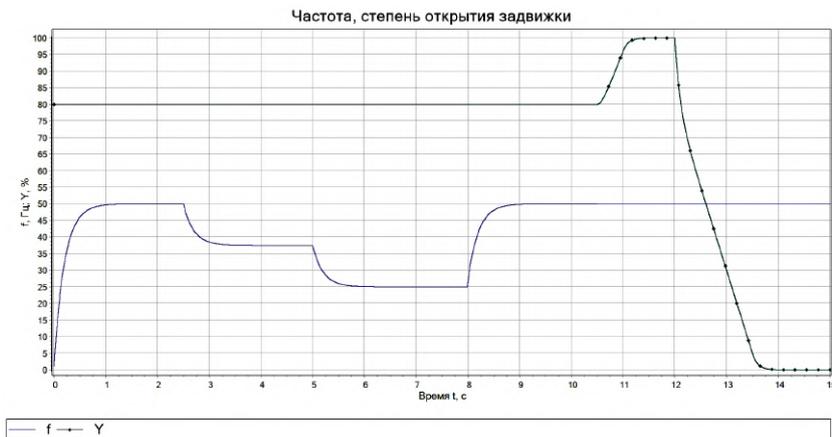


Рис. 4. График задающих воздействий на электропривод: частота и степень открытия задвижки напорного трубопровода

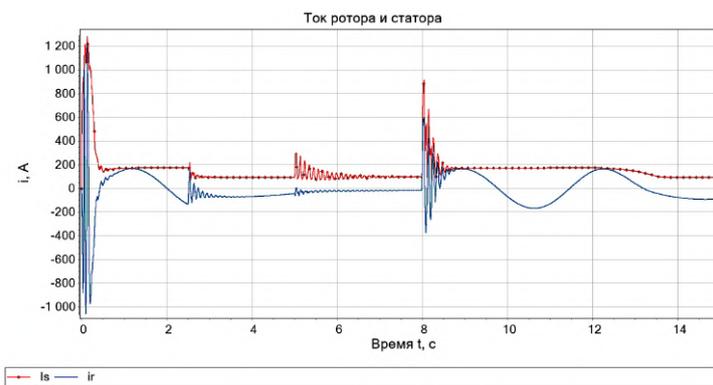


Рис. 5. График переходных процессов тока статора и ротора

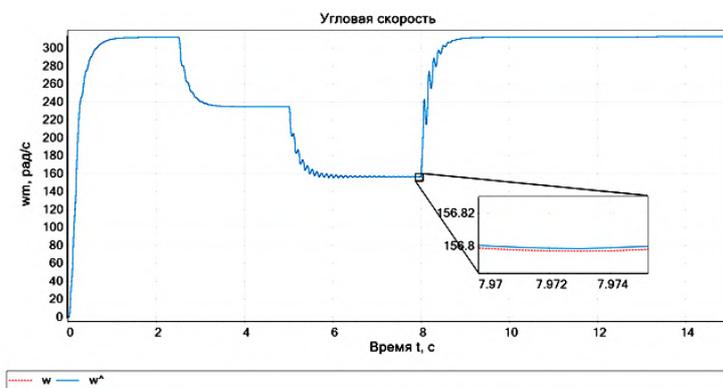


Рис. 6. График переходных процессов угловой скорости ротора асинхронного двигателя

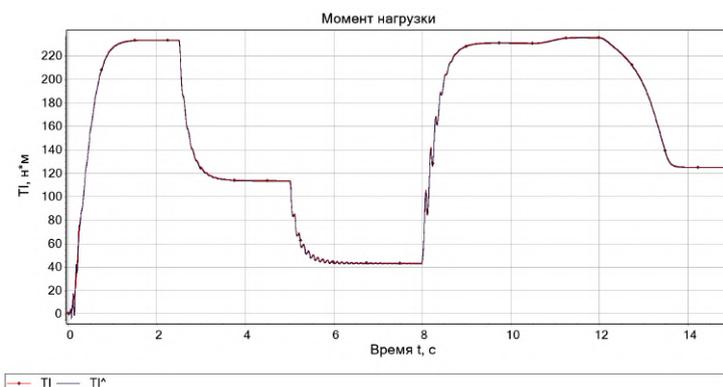


Рис. 7. График переходных процессов момента сопротивления насоса

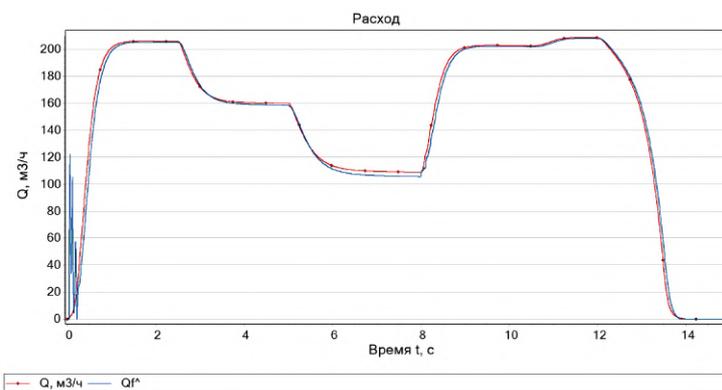


Рис. 8. График переходных процессов объемного расхода жидкости центробежного насоса ( $Q$ )

рость вращения ротора, определенная с помощью наблюдателя, незначительно отличается от эталонной (рис. 6).

Максимальная относительная погрешность, в динамике, при определении момента сопротивления составляет 5,5 %, в статике 1,01 % (рис. 7). Погрешность наблюдателя объемного расхода в динамике составляет 8,04 %, в установившемся режиме работы 3 % (без учета пуска и останова). Стоит отметить, что в реальных условиях эксплуатации, при реализации регуляторов в системе управления электропривода возмущающие воздействия, как правило, будут значительно меньше, что положительно скажется на точности работы наблюдателя объемного расхода, но данный вопрос требует отдельных исследований.

#### Библиографический список

1. Чернышева Т. А., Аникин В. В., Чернышев И. А., Чернышев А. Ю. Частотно-регулируемый электропривод центробежных насосных установок добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 12. С. 168–178. DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2417. EDN: DLSLIX.
2. Милорадов В. А. Моделирование вентильного электропривода установки электроцентробежного насоса в неподвижной системе координат // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 435–439. EDN: FWJZDA.
3. Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю. А., Карницкий Н. Б. Перспективы установки частотно-регулируемого электропривода на циркуляционных насосах системы технического водоснабжения ТЭЦ // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13, № 4 (52). С. 14–27. EDN: EUIRRC.
4. Yang R., Zhang M., Tarn T.-J. Adaptive backstepping control of a micro-needle micro-pump integrated insulin delivery system for diabetes care // 2007 7th IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE NANO). 2007. P. 448–53. DOI: 10.1109/NANO.2007.4601229.
5. Иванова В. Р., Киселев И. Н. Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21, № 5. С. 59–70. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70. EDN: FJSXVL.
6. LaNasa P. J., Upp E. L. Fluid Flow Measurement: A Practical Guide to Accurate Flow Measurement. 3rd ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2014. 256 p. ISBN: 9780124095243; 978-0124095243.
7. Рожков В. В., Федотов В. В. Имитационное моделирование адаптивного идентификатора скорости асинхронного двигателя агломерационной машины // Прикладная информатика. 2022. Т. 17, № 6 (102). С. 36–55. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-6-36-55. EDN: FHSVTU.
8. Антипов А. С., Краснов Д. В. Синтез системы слежения для однозвенного бездатчикового манипулятора при воздействии негладких возмущений // Проблемы управления. 2022. № 3. С. 3–15. DOI: 10.25728/ru.2022.3.1. EDN: SUVQEX.
9. Bhaumik A., Das S. Virtual voltage vector based predictive current control of speed sensorless induction motor drives // ISA Transactions. Vol. 133 (6). 2023. P. 495–504. DOI: 10.1016/j.isatra.2022.07.007.
10. Merrassi W. E., Abounada A., Ramzi M. Advanced speed sensorless control strategy for induction machine based on neuro-MRAS observer // Materials Today: Proceedings. Vol. 45. 2021. P. 7615–7621. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.081.
11. Lin-Shi X., Massioni P., Gauthier J.-Y. Estimation of inverter voltage disturbances for induction machine drive using LPV observer with convex optimization // Mathematics and Computers in Simulation. 2021. Vol. 184. P. 196–209. DOI: 10.1016/j.matcom.2020.06.004.
12. Ren Y., Wang R., Rind S. J. [et al.] Jiang Speed sensorless nonlinear adaptive control of induction motor using combined speed and perturbation observer // Control Engineering Practice. 2022. Vol. 123. DOI: 10.1016/j.conengprac.2022.105166.

**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: oalisenko@omgtu.ru

#### Для цитирования

Лысенко О. А. Наблюдатель расхода жидкости асинхронного электропривода центробежного насоса // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 100–107. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-100-107.

Статья поступила в редакцию 27.05.2024 г.  
 © О. А. Лысенко

# FLUID FLOW OBSERVER FOR AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A CENTRIFUGAL PUMP

The article examines the development of a system for monitoring the volumetric supply of liquid in pumping units. The relevance of the research is due to the growing requirements for automation of control of pumping systems. The key element of the system is the observer, which allows evaluating the main parameters of the installation, such as the pump rotation speed and the moment of resistance. The electric drive of the pump uses an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor, the rotation speed of which is controlled. The pressure in the discharge pipeline is created by a centrifugal pump. The observer is based on a model of an asynchronous motor in a fixed coordinate system, and the Luenberger observer is used to estimate the rotation speed and torque of the pump. To identify the volume flow, a centrifugal pump model is used, parameterized by a second-degree polynomial. The authors present simulation results showing the high accuracy of the developed observer, with an error of no more than 3% in steady state. The results demonstrate the effectiveness of the proposed approach for constructing a monitoring system for pumping units.

**Keywords:** flow identifier, asynchronous electric drive, Luenberger observer, centrifugal pump, double squirrel cage rotor, pumping unit.

## References

1. Chernysheva T. A., Anikin V. V., Chernyshev I. A., Chernyshev A. Yu. Chastotno-reguliruyemyy elektropriwod tsentrobezhnykh nasosnykh ustanovok dobychi nefi [Variable speed electric drive of centrifugal pump in oil lifting plants] // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring geosursov. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019. Vol. 330, no. 12. P. 168–178. DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2417. EDN: DLSLIX. (In Russ.).

2. Miloradov V. A. Modelirovaniye ventil'nogo elektropriroda ustanovki elektrosentrobezhnogo nasosa v nepodvizhnoy sisteme koordinat [Simulation of the permanent ma gnet synchronous motor electric drive of the electric submersible pump in a fixed coordinate system] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2021. No. 2. P. 435–439. EDN: FWJZDA. (In Russ.).

3. Zenovich-Leshkevich-Ol'pinskiy Yu. A., Karnitskiy N. B. Perspektivy ustanovki chastotno-reguliruyemogo elektropriroda na tsirkulyatsionnykh nasosakh sistemy tekhnicheskogo vodosnabzheniya TETs [Prospects for frequency control installation electric drive on circulation pumps CHPP technical water supply systems] // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2021. Vol. 13, no. 4 (52). P. 14–27. EDN: EUIRRC. (In Russ.).

4. Yang R., Zhang M., Tam T.-J. Adaptive backstepping control of a micro-needle micro-pump integrated insulin delivery system for diabetes care // 2007 7th IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE NANO). 2007. P. 448–53. DOI: 10.1109/NANO.2007.4601229. (In Engl.).

5. Ivanova V. R., Kiselev I. N. Chastotno-reguliruyemyy elektropriwod dlya energosberezheniya i optimizatsii

tekhnologicheskikh protsessov v elektrotekhnicheskikh kompleksakh [Frequency-adjustable electric drive for energy saving and optimization of technological processes in electrical complexes] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2019. Vol. 21, no. 5. P. 59–70. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70. EDN: FJSXVL. (In Russ.).

6. LaNasa P. J., Upp E. L. Fluid Flow Measurement: A Practical Guide to Accurate Flow Measurement. 3rd ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2014. 256 p. ISBN 9780124095243; 978-0124095243. (In Engl.).

7. Rozhkov V. V., Fedotov V. V. Imitatsionnoye modelirovaniye adaptivnogo identifikatora skorosti asinkhronnogo dvigatelya aglomeratsionnoy mashiny [Simulation modeling of the adaptive speed identifier of an induction motor of a sintering machine] // *Prikladnaya informatika. Journal of Applied Informatics*. 2022. Vol. 17, no. 6 (102). P. 36–55. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-6-36-55. EDN: FHSVTU. (In Russ.).

8. Antipov A. S., Krasnov D. V. Sintez sistemy slezheniya dlya odnozvennogo bezdatchkovogo manipulyatora pri vozdeystvii negladkikh vozmushcheniy [Tracking system design for a single-link sensorless manipulator under nonsmooth disturbances] // *Problemy upravleniya. Problemy Upravleniya*. 2022. No. 3. P. 3–15. DOI: 10.25728/pu.2022.3.1. EDN: SUVQEX. (In Russ.).

9. Bhaumik A., Das S. Virtual voltage vector based predictive current control of speed sensorless induction motor drives // *ISA Transactions*. Vol. 133 (6). 2023. P. 495–504. DOI: 10.1016/j.isatra.2022.07.007. (In Engl.).

10. Merrassi W. E., Abounada A., Ramzi M. Advanced speed sensorless control strategy for induction machine based on neuro-MRAS observer // *Materials Today: Proceedings*. Vol. 45. 2021. P. 7615–7621. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.081. (In Engl.).

11. Lin-Shi X., Massioni P., Gauthier J.-Y. Estimation of inverter voltage disturbances for induction machine drive using

LPV observer with convex optimization // Mathematics and Computers in Simulation. 2021. Vol. 184. P. 196–209. DOI: 10.1016/j.matcom.2020.06.004. (In Engl.).

12. Ren Y., Wang R., Rind S. J. [et al.] Jiang Speed sensorless nonlinear adaptive control of induction motor using combined speed and perturbation observer // Control Engineering Practice. 2022. Vol. 123. DOI: 10.1016/j.conengprac.2022.105166. (In Engl.).

**LYSENKO Oleg Aleksandrovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, 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

ResearcherID: N-5528-2015

Correspondence address: oalisenko@omgtu.ru

#### For citations

Lysenko O. A. Fluid flow observer for an asynchronous electric drive of a centrifugal pump // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 4 (192). P. 100–107. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-100-107.

Received May 27, 2024.

© O. A. Lysenko