

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.3

Н. А. Автушенко, Г. С. Ленеvский, канд. техн. наук, доц., Д. С. Каплун**ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНЫМИ АГРЕГАТАМИ
В СИСТЕМАХ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

В статье рассмотрена методика оценки и расчета электрической части систем горячего водоснабжения, разработана математическая модель в среде MATLAB. В статье дана оценка целесообразности использования частотного регулирования, экономичности различных способов включения частотных преобразователей. Статья содержит алгоритм расчета регулятора скорости, который может быть реализован непосредственно частотным преобразователем. Полученное решение позволяет использовать математическую модель для исследования квазиустановившихся, переходных и нестационарных переходных процессов в сетевом контуре тепловых электростанций и в магистральных трубопроводах горячего водоснабжения.

Введение

Регулирование параметров переходных процессов в магистральных трубопроводах можно получить, используя запорную арматуру (задвижку) или устройства частотного регулирования электрических параметров электродвигателя сетевого насоса. Регулирование параметров с помощью запорной арматуры может быть ручным (без применения средств автоматизации) и автоматическим (может использоваться регулятор), но в любом случае оно является неполноценным. В данном случае можно говорить о потерях энергии и, как следствие, уменьшении КПД системы.

Так, при регулировании скорости двигателя максимальные потери энергии в роторной цепи составляют до 17 %, в то время как максимальные потери энергии при регулировании трубопроводной арматурой – до 38,5 %. Такое регулирование приводит более чем к 2-кратному увеличению потерь мощности в сравнении с регулированием скорости двигателя.

Полноценное регулирование параметров технологического процесса может осуществляться с помощью частотного привода. В данной системе сетевых насосных агрегатов может быть использовано несколько способов включения частотных

приводов, но преимущество имеют индивидуальный и групповой. Индивидуальный привод предполагает использование для каждого электродвигателя сетевого насоса своего частотного преобразователя. Данный способ построения системы регулирования является дорогостоящим, однако он позволяет наиболее полно использовать преобразователи в процессе регулирования, т. е. делает процесс наиболее полноценным, с максимальным КПД.

Работа одного частотного преобразователя на два насосных агрегата имеет ряд своих ограничений. При таком регулировании частотный привод ставится со значительно завышенной мощностью для регулирования во всем диапазоне одновременно для двух приводов по идентичному алгоритму. Такой способ не является удачным, т. к. когда параметры сети значительно снижены (это обусловлено технологическим процессом), необходимо отключить первый двигатель. Второй остается с нагрузкой, близкой к номинальной, при этом параметры преобразователя находятся в нижней части диапазона регулирования. При дальнейшем снижении мощности привод попадает на границу нижнего

диапазона. Там привод может работать нестабильно, ухудшается КПД электрической части и системы в целом. Поэтому для полноценной реализации режима работы станции целесообразно использовать индивидуальный частотный привод.

В условиях жесткого контроля расходования денежных средств на модернизацию основных фондов энергосистемы, в основном, проектируется один частотный привод с мощностью, близкой к параметрам механических мощностей сетевого насоса с учетом возможных перегрузок. Такой режим позволяет при работе двух и более насосных агрегатов осуществлять регулирование только в очень узком диапазоне (не более $\pm 10\%$ от номинального расхода). Регулирование осуществляется следующим образом: все насосы запускаются в номинальном (нерегулируемом) режиме, т. е. становятся в «базу», последний насос догружает систему до требуемых параметров. Общая производительность составляет $Q_{\Sigma} = nQ_{H/A}$ (n – количество работающих насосов). При таких параметрах гидравлической системы, когда расход или значительно возрастает, или снижается, общая производительность будет подчиняться следующим требованиям:

– в случае увеличения

$$Q_{\Sigma} > nQ_{НОМ.Н/А}, \quad Q_{\Sigma} = (n+1)Q_{H/A};$$

– в случае снижения

$$Q_{\Sigma} < nQ_{НОМ.Н/А}, \quad Q_{\Sigma} = (n-1)Q_{H/A}.$$

При регулировании в большем диапазоне, когда давление, формируемое регулируемым насосом значительно ниже номинального, и все насосные агрегаты, как в данном случае, работают на один общий прямой коллектор, регулируемый насос будет или незначительно влиять на QH-параметры системы, или вообще не будет оказывать влияния на параметры системы. То есть насос будет «задавлен» давлением прямого коллектора, сформированным другими нерегулируемыми на-

сосами. При этом остальные насосы будут перегружены: при общей точке «всаса» они разделят, насколько это возможно, нагрузку регулируемого насоса (рис. 1).

Данные проблемы регулирования исчезают при использовании индивидуального привода. Алгоритм управления является одинаковым для всех насосов, условия отключения (включения) дополнительного насоса, перечисленные выше, сохраняются.

Графическая интерпретация группового и индивидуального регулирования сетевых электронасосов представлена на рис. 1 и 2.

Вклад каждого насоса в общую производительность равномерно распределен.

Рис. 2 свидетельствует о том, что при регулировании одного из четырех насосов зона совместной работы группы нерегулируемых насосов с регулируемым (ось p) очень мала. Общая производительность при включении четвертого насоса со скоростью 90% от номинальной увеличивается не более чем на 25% от номинальной производительности насосного агрегата. При этом снижение мощности происходит в $1/\sqrt{3} = 38,5\%$. То есть используя $61,5\%$ мощности установки, достигается не более 25% производительности. Такое регулирование не является экономичным.

Для дальнейшего анализа выбрана система с индивидуальным приводом и формированием одинакового задания на все насосы с учетом общей загрузки (общего объема воды в обратном коллекторе) группы сетевых насосов.

Количество работающих насосов упрощенно может быть оценено по формуле

$$n = ABS \left(\frac{Q_{\Sigma}}{Q_{НОМ.Н/А}} \right). \quad (1)$$

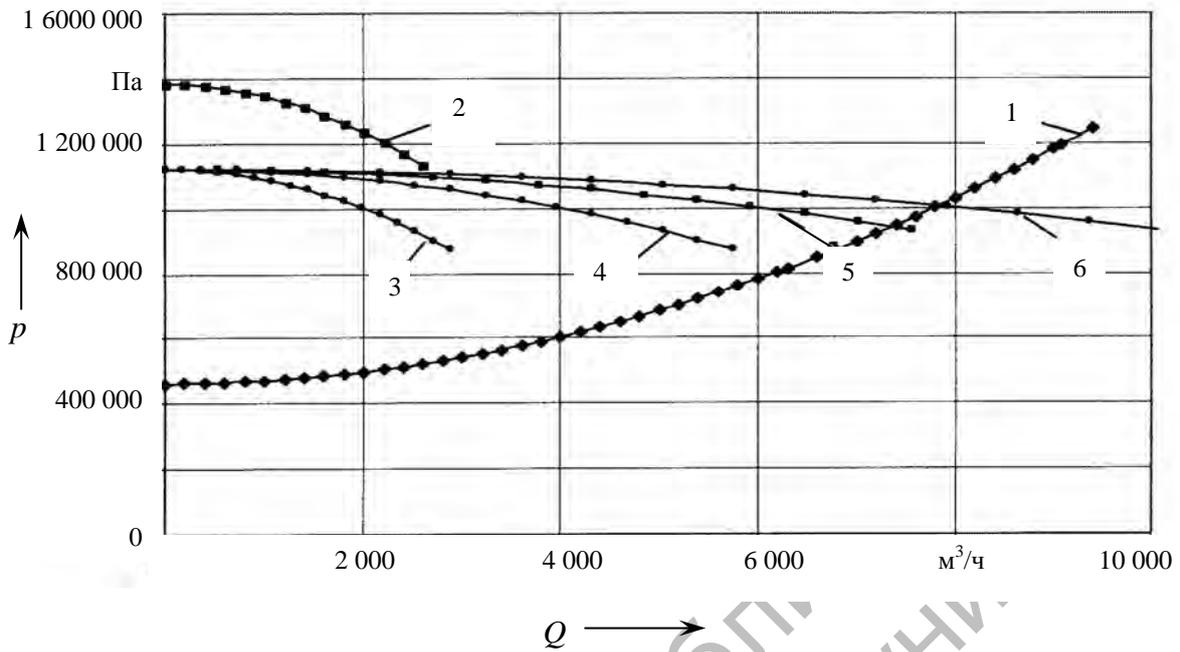


Рис. 1. Семейство механических характеристик гидравлической системы. Регулирование группы частотных насосных агрегатов с индивидуальным приводом: 1 – магистральная характеристика гидравлической системы; 2 – естественная QH-характеристика насоса СЭ1250-140; 3–6 – QH-характеристика группы из 1, 2, 3, 4 насосов при одновременном снижении скорости вниз от основной на 10 %

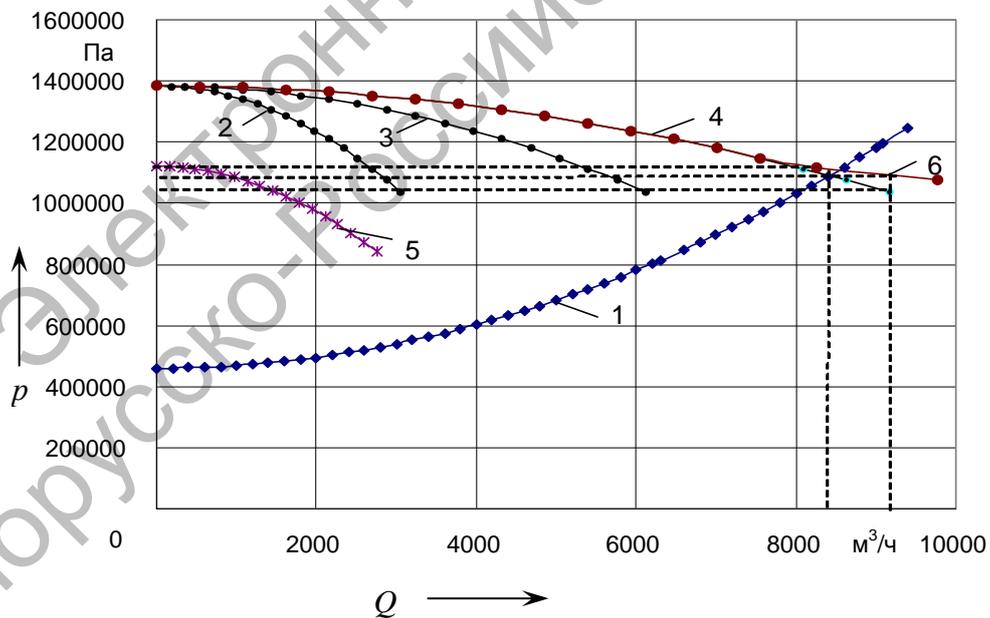


Рис. 2. Регулирование группы частотных насосных агрегатов с групповым приводом: 1 – магистральная характеристика гидравлической системы; 2–4 – QH-характеристика группы из 1, 2, 3 насосов СЭ1250-140; 5 – QH-характеристика насоса СЭ1250-140 при снижении скорости на 10 %; 6 – суммарная характеристика четырех насосов

При этом общая система регулирования подчиняется следующему закону:

$$\begin{cases} 0 \leq Q \leq 1,1Q_{НОМ.Н/A}, & n = 1; \\ 1,1Q_{НОМ.Н/A} \leq Q \leq 2,1Q_{НОМ.Н/A}, & n = 2; \\ 2,1Q_{НОМ.Н/A} \leq Q \leq 3,1Q_{НОМ.Н/A}, & n = 3; \\ Q \geq ((n-1) + 0,1)Q_{НОМ.Н/A}, & n = 4. \end{cases} \quad (2)$$

В качестве преобразователя частоты используется автономный инвертор напряжения (АИН), с помощью которого можно регулировать скорость двигателя, – так называемое вольт-частотное управление. Преобразователь такого типа используется для механизмов с вентиляторной нагрузкой (необходимо управление скоростью двигателя), разновидностью которой является сетевой электронасос. В качестве закона управления преобразователем частоты используется закон $\Psi_1 = const$.

Асинхронный электродвигатель

Для реализации преобразователя частоты в математической среде MATLAB, моделирования переходных процессов с использованием частотного привода и возможностью управления по местным обратным связям необходимо использовать модель электродвигателя (рис. 3) в осях ХУ (система вращающихся координат приведена к вращающемуся магнитному полю статора однофазной обобщенной электрической машины). При этом делаются следующие допущения [1]:

- питающая сеть является сетью бесконечной мощности;
- магнитодвижущие силы, созданные фазными токами, синусоидально распределены вдоль воздушного зазора (без учета высших пространственных гармоник магнитного поля);
- асинхронный двигатель симметричен;
- не учитывается влияние пазов;
- насыщение и потери в стали отсутствуют;
- не учитываются емкости внутри

обмоток;

– кинематическая расчетная схема электропривода (АД–СЭН) соответствует одноступенчатой расчетной схеме.

$$\begin{cases} U_{1X} = i_{1X} \cdot R_1 + \frac{d\psi_{1X}}{dt} - \omega_{0эл} \cdot \psi_{1Y}; \\ U_{1Y} = i_{1Y} \cdot R_1 + \frac{d\psi_{1Y}}{dt} + \omega_{0эл} \cdot \psi_{1X}; \\ U'_{2X} = i'_{2X} \cdot R'_2 + \frac{d\psi_{2X}}{dt} - (\omega_{0эл} - \omega_{2эл}) \cdot \psi_{2Y}; \\ U'_{2Y} = i'_{2Y} \cdot R'_2 + \frac{d\psi_{2Y}}{dt} + (\omega_{0эл} - \omega_{2эл}) \cdot \psi_{2X}; \\ M = \frac{3}{2} p_{II} K_1 (\psi_{1Y} \cdot i'_{2X} - \psi_{1X} \cdot i'_{2Y}). \end{cases} \quad (3)$$

Токи статора и ротора описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} i_{1X} = \frac{1}{L_1} \psi_{1X} - K_1 \cdot i'_{2X}; \\ i_{1Y} = \frac{1}{L_1} \psi_{1Y} - K_1 \cdot i'_{2Y}; \\ i_{2X} = \frac{1}{L_2} \psi_{2X} - K_2 \cdot i_{1X}; \\ i_{2Y} = \frac{1}{L_2} \psi_{2Y} - K_2 \cdot i_{1Y}; \\ i_1 = \sqrt{i_{1X}^2 + i_{1Y}^2}; \\ i'_2 = \sqrt{i'_{2X}^2 + i'_{2Y}^2}, \end{cases} \quad (4)$$

где U_{1X}, U_{1Y} – проекции напряжения статора на оси X и Y соответственно; U'_{2X}, U'_{2Y} – проекции приведенного напряжения ротора на оси X и Y соответственно; i_{1X}, i_{1Y} – проекции тока статора на оси X и Y соответственно; i'_{2X}, i'_{2Y} – проекции приведенного тока ротора на оси X и Y соответственно; $\psi_{1X}, \psi_{1Y}, \psi_{2X}, \psi_{2Y}$ – проекции потокоцеплений статора и ротора на оси X и Y соответственно; K_1, K_2 – коэффициенты электромагнитной связи соответственно; L_1, L_2 – индуктивности обмоток статора

и ротора соответственно.

Тогда с учётом одномассовой расчётной схемы уравнения (3) и (4) дополняются уравнением движения электропривода для одномассовой расчетной схемы:

$$M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}. \quad (5)$$

С учетом выражений (3)...(5) составляется система уравнений, описывающая асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором.

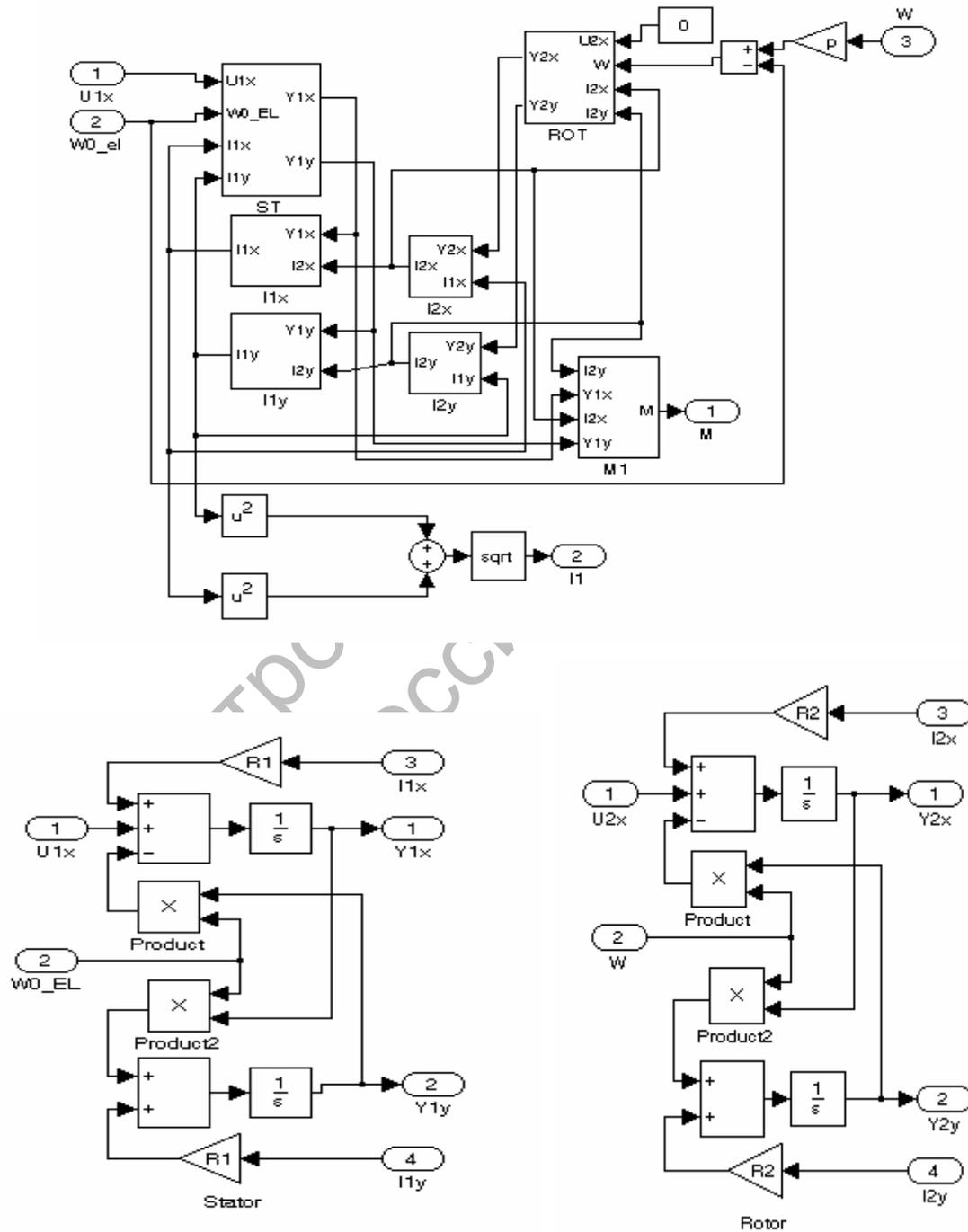


Рис. 3. Математическая модель АДКЗ в осях XY в MATLAB

Частотный преобразователь

Реализуемый АИН имеет в своем составе силовые ключи (IGBT-транзисторы), частота коммутации транзисторов (частота ШИМ-модуляции) составляет в современных преобразователях 10 кГц.

В составе преобразователя частоты

реализована микропроцессорная система управления скорости вращения электропривода с программной реализацией ПИД-регулятора и датчика (вычислителя) скорости. Функциональная схема системы стабилизации скорости вращения показана на рис. 4.

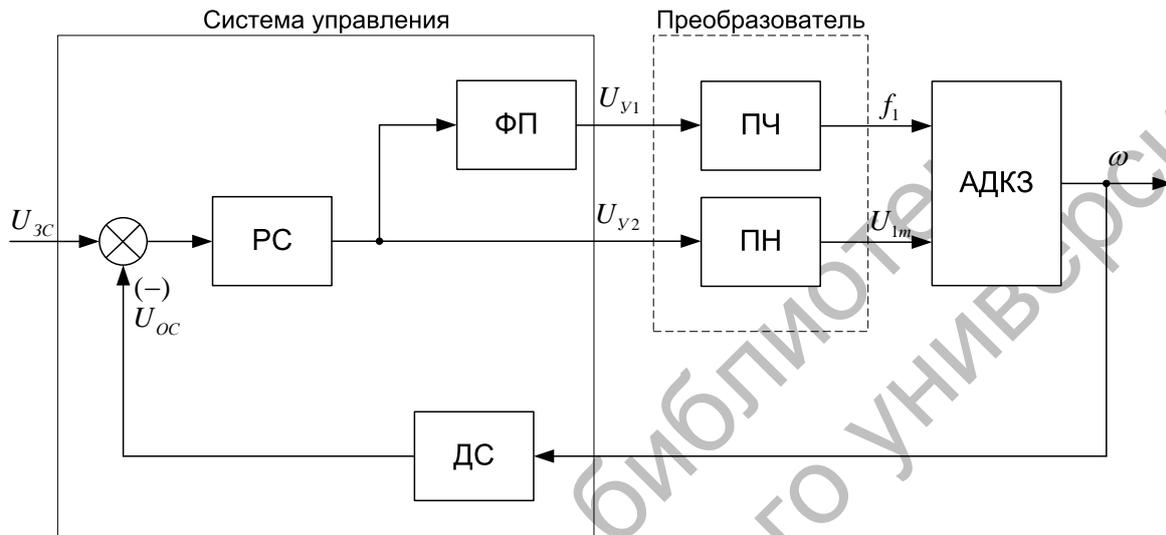


Рис. 4. Функциональная схема электропривода

На рис. 4 введены следующие обозначения:

- РС – регулятор скорости;
- ФП – функциональный преобразователь;
- ПН – преобразователь напряжения;
- ПЧ – преобразователь частоты;
- ДС – датчик скорости вращения двигателя.

В функциональной схеме обозначены сигналы:

- U_{zc} – напряжение задания скорости;
- U_{y1} – напряжение управления каналом напряжением;
- U_{y2} – напряжение управления каналом частотой;
- U_{1m} – амплитудное значение напряжения статора;
- f_1 – частота напряжения статора;
- ω – скорость вращения двигателя.

На основании функциональной схемы составляется структурная схема элек-

тропривода, которая необходима для расчета регулятора скорости привода. Для этого асинхронный электродвигатель представляется в виде линеаризованной динамической механической характеристики.

$$T_{\omega} \frac{dM}{dt} + M = \beta(\omega_0 - \omega), \quad (6)$$

где T_{ω} – электромагнитная постоянная времени электродвигателя; β – жесткость линеаризованной механической характеристики электродвигателя; M – электромагнитный момент двигателя; ω, ω_0 – угловая скорость и скорость идеального холостого хода двигателя.

Жесткость механической характеристики определяется по формуле

$$\beta = \frac{2M_K}{\omega_0 \cdot s_K}, \quad (7)$$

где ω_0 – номинальная синхронная скорость двигателя.

Электромагнитная постоянная времени [1]

$$T_e = \frac{1}{\omega_0 p_{\Pi} S_K}, \quad (8)$$

где p_{Π} – число пар полюсов двигателя.

Преобразовав выражение (6) по Лапласу и добавив выражение механиче-

ской части электропривода для одно-массовой расчетной схемы, составляется структурная схема электропривода по формуле (3) с учетом того, что преобразователь частоты описывается инерционным звеном первого порядка с коэффициентом передачи K_{Π} и постоянной времени T_{Π} . Структурная схема электропривода представлена на рис. 5.

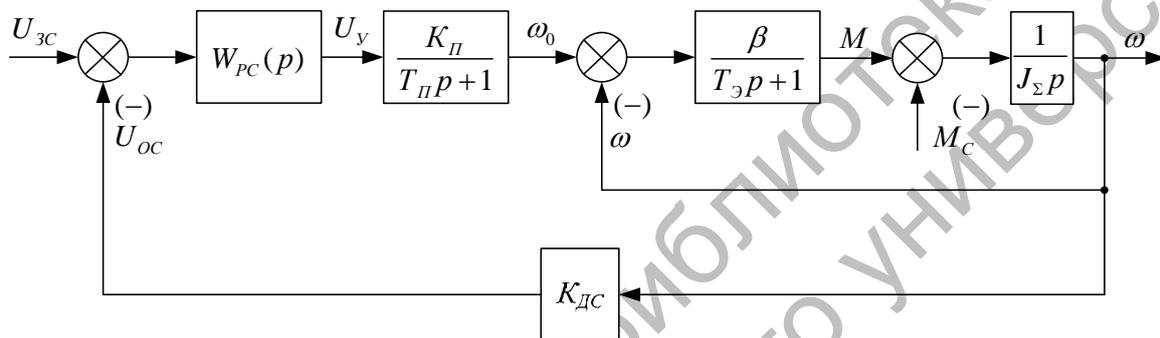


Рис. 5. Структурная схема электропривода

Коэффициент передачи преобразователя частоты определяется по формуле

$$K_{\Pi} = \frac{\omega_{0эл}}{U_y}; \quad (9)$$

$$\omega_{0эл} = 2 \cdot \pi \cdot f_c, \quad (10)$$

где $\omega_{0эл}$ – максимальное значение круговой частоты напряжения на выходе преобразователя.

Передаточная функция линеаризованного асинхронного двигателя при одно-массовой расчетной схеме (3)

$$W_{эд}(p) = \frac{\omega(p)}{\omega_{0эл}(p)} = \frac{1/\beta}{(T_{\omega} \cdot p + 1) \frac{J_{\Sigma}}{\beta} p + 1}. \quad (11)$$

При синтезе регулятора скорости в качестве малой некомпенсируемой постоянной времени выбирается постоянная времени инвертора $T_{\mu} = T_{\Pi}$.

Передаточная функция непрерывного пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора будет иметь вид:

$$W_{PC}(p) = \frac{(T_{\omega} p + 1) \cdot J_{\Sigma} \cdot p + \beta}{a_c \cdot K_{\Pi} \cdot K_{dc} \cdot T_{\mu} \cdot p} = K_{PC} + \frac{1}{T_{PC} p} + K_D \cdot p. \quad (12)$$

Передаточная функция аналогового ПИД-регулятора, согласно (12), является суммой трех составляющих:

$$W_{PC}(p) = W_{\Pi}(p) + W_{И}(p) + W_{Д}(p) = K_{PC} + \frac{1}{T_{PC} p} + K_D \cdot p. \quad (13)$$

Дифференцирующая часть регулятора скорости

$$K_D = \frac{T_{\Sigma} \cdot J_{\Sigma}}{a_c \cdot K_{\Pi} \cdot K_{\partial c} \cdot T_{\mu}}. \quad (14)$$

Пропорциональная часть регулятора скорости

$$K_{PC} = \frac{J_{\Sigma}}{a_c \cdot K_{\Pi} \cdot K_{\partial c} \cdot T_{\mu}}. \quad (15)$$

Постоянная времени интегрирования регулятора скорости

$$T_{PC} = \frac{a_c \cdot K_{\Pi} \cdot K_{\partial c} \cdot T_{\mu}}{\beta}. \quad (16)$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости

$$W_{KC}(p) = \frac{1/K_{ДС}}{a_c \cdot T_{\mu}^2 \cdot p^2 + a_c \cdot T_{\mu} \cdot p + 1}.$$

Пренебрегая высшим порядком, можно считать

$$W_{KC}(p) \cong \frac{1/K_{ДС}}{a_c T_{\mu} p + 1}. \quad (17)$$

При математическом описании преобразователя частоты вводятся следующие допущения:

1) пренебрегается электромагнитными процессами внутри силовой схемы преобразователя;

2) так как внутренняя частота широтно-импульсной модуляции достаточно велика, то преобразователь считается непрерывным динамическим звеном;

3) параметры преобразователя считаются неизменными в течение всего цикла работы.

Тогда, с достаточной для инженерных расчетов точностью, его можно описать как 2-канальную систему с инерционными динамическими звеньями. Передаточная функция преобразователя по каналу регулирования напряжения

$$W_{ПЧН}(p) = \frac{K_U}{T_{\mu} \cdot p + 1}, \quad (18)$$

где K_U – коэффициент передачи преобразователя по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{1m}}{U_y}. \quad (19)$$

Передаточная функция преобразователя по каналу регулирования частоты

$$W_{ПЧЧ}(p) = \frac{K_{\omega}}{T_{\mu} \cdot p + 1}, \quad (20)$$

где K_{ω} – коэффициент передачи преобразователя по частоте, $K_{\omega} = K_{\Pi}$.

Параметрический датчик (вычислитель) скорости представляется динамическим пропорциональным звеном с передаточной функцией

$$K_{ДС} = \frac{U_y}{\omega_{ном}}. \quad (21)$$

При моделировании регулятора допускается, что быстродействие и разрядность канала данных микропроцессорной системы достаточны для того, чтобы представить регулятор непрерывным динамическим звеном.

На выходе регулятора ставится нелинейность типа «ограничение», которая учитывает заданное в программе управления насыщение как интегрирующей части, так и всего регулятора в целом. Схема электропривода сетевого электронасоса в сочетании с моделью, учитывающей динамические и статические свойства системы магистральных трубопроводов как системы с распределенными параметрами [2], представлена на рис. 6.

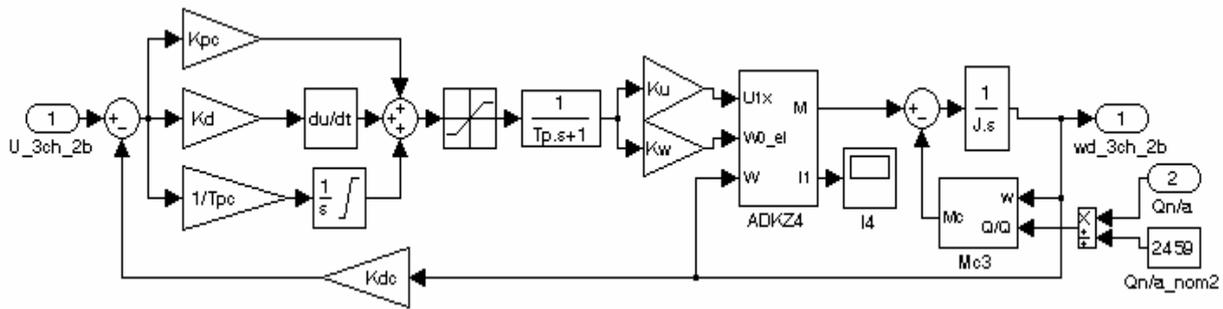


Рис. 6. Схема модели электропривода

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фигаро, Б. И.** Теория электропривода : учеб. пособие / Б. И. Фигаро, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 527 с.

2. **Автушенко, Н. А.** Моделирование систем горячего водоснабжения магистральных трубопроводов в среде MATLAB / Н. А. Автушенко, Г. С. Ленеvский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 1 (18). – 165 с. : ил.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 07.07.2008

N. A. Avtushenko, G. S. Lenevsky, D. S. Kaplun **Choice of control elements of pump units** **in hot water supply systems**

Methods of estimation and calculation of electric part of hot water supply systems is considered in the article. A mathematical model in MATLAB has been developed. The article gives an assessment of reasonability of frequency regulation use, economy of different ways of using frequency converters. The article contains the algorithm of speed regulator calculation, which can be realized by frequency converter. The solution allows using the mathematical model for research of quasisteady processes, transients and non-stationary transients in heat power plants and in main lines of hot water supply.