

И. Ф. Нугаев, Р. В. Искужин

КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ В НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИНАХ

В статье приведены результаты разработки комплекса статических и динамических моделей процессов в нефтедобывающих скважинах, как инструмента для решения задач синтеза алгоритмов автоматического управления. Модели основаны на базовых положениях гидродинамики и электромеханики и представлены в форме переменных состояния. Рассмотрены особенности применения предложенного комплекса моделей. Приведены результаты вычислительных экспериментов; подтверждающих адекватность моделей. *Математические модели; синтез алгоритмов*

Эффективность нефтедобывающих скважин (НС) во многом определяется качеством оперативного управления протекающими в ней процессами. Задачами управления являются установка требуемого режима добычи, компенсация возмущающих воздействий, координирование работы группы скважин. Современной тенденцией в данной области является повышение доли НС, применяющих установки электроцентробежных насосов (УЭЦН), оснащенных управляемыми преобразователями частоты (ПЧ). Данные установки обеспечивают возможность создания систем автоматического управления НС (САУ НС) без участия оператора.

В рамках проведенных исследований был выполнен анализ эффективности современных САУ НС на базе УЭЦН с ПЧ различных производителей. Опубликованные результаты испытаний ряда систем, проведенных на базе нефтедобывающих предприятий, показывают, что сегодня существует ряд нерешенных задач, препятствующих их широкому внедрению. К одной из таких задач относится необходимость повышения качества алгоритмов автоматического управления. Испытания показывают, что существующие алгоритмы не используют в полной мере потенциальные возможности САУ НС по оптимизации базовых показателей, таких как объем добычи и энергетические затраты. В результате достигаются незначительные преимущества, по сравнению с традиционными ручным управлением, что, с учетом стоимости САУ, часто является причиной отказа от их внедрения.

Качество алгоритмов управления во многом определяется применяемыми методами синтеза, основу которых составляют математические модели управляемых процессов. В данной статье представлены результаты разработок и исследований математических моделей процессов в НС, обеспечивающих эффективное применение методов синтеза алгоритмов автоматического управления современной теории управления.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На первом этапе исследований был определен перечень объектов НС, моделирование которых является необходимым с точки зрения синтеза алгоритмов управления. В общем случае к данным объектам относятся: объект управления, исполнительные механизмы, измерительная система. Для выделения указанных объектов в рамках НС, была проанализирована ее обобщенная структура, включающая в себя следующие основные подсистемы (рис. 1):

1. Скважинная система (СС) – система резервуаров, в которых располагается добываемая жидкость: а) зона дренирования скважины (ЗДС) – область продуктивного пласта, на которую оказывает влияние данная скважина; б) обсадная колонна (ОК) – колонна труб, связанная с ЗДС перфорационными отверстиями, обеспечивает предварительное накопление добываемой жидкости; в) насосно-компрессорные трубы (НКТ) – колонна труб, расположенная в ОК, обеспечивает перемещение добываемой жидкости на поверхность.

2. Жидкость в скважинной системе (ЖСС) – многофазная смесь (нефть, вода, газ, песок и др.), распределена по резервуарам СС:

а) жидкость в ЗДС; б) жидкость в ОК; в) жидкость в НКТ.

3. Установка электроцентробежного насоса (УЭЦН): а) центробежный насос (ЦН) – обеспечивает перекачивание добываемой жидкости из ОК в НКТ и далее на поверхность; б) погружной электродвигатель (ПЭД) – обеспечивает вращение вала ЦН.

4. Станция управления погружным электродвигателем (СУ ПЭД): 3-фазная сеть, преобразователь частоты, повышающий трансформатор, контроллер.

5. Телеметрическая система (ТС) – обеспечивает измерение, сбор, обработку и передачу информации о параметрах объектов скважинной системы, включает в себя: а) термоманометрическая система (ТМС) погружной телеметрии; б) наземная измерительная система.

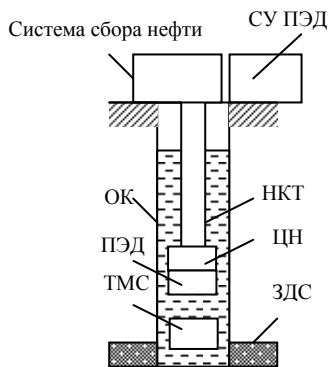


Рис. 1. Структура нефтедобывающей скважины

На основе анализа структуры НС определена обобщенная структура САУ НС, включающая в себя (рис. 2): объект управления – жидкость в скважинной системе (ЖСС); исполнительный механизм – установка электроцентробежного насоса (УЭЦН); измерительная система – телеметрическая система (ТС); система принятия решений – станция управления ПЭД.

На основе обобщенной структуры САУ НС определены объекты НС, моделирование которых является наиболее актуальными с точки зрения задачи синтеза алгоритмов управления:

- объект управления – жидкость в скважинной системе (ЖСС);
- исполнительный механизм – установка электроцентробежного насоса (УЭЦН);
- расширенный объект управления – включает в себя УЭЦН и ЖСС.

В качестве искомым моделей приняты следующие:

- модель ЖСС, как объекта управления;
- модель УЭЦН, как исполнительного механизма;
- объединенная модель ЖСС и УЭЦН, как расширенного объекта управления.

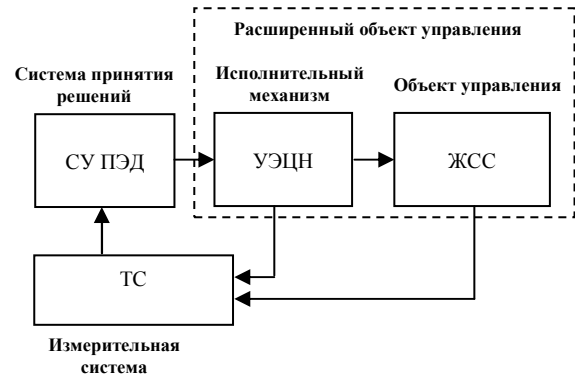


Рис. 2. Обобщенная структура САУ НС

На следующем этапе исследований определена требуемая форма моделей. В качестве базовой принята форма модели в переменных состояния, как наиболее универсальная с точки зрения современных методов синтеза алгоритмов управления [1]. Для построения модели данной формы полное множество параметров Z моделируемого объекта разбивается на подмножества по следующему функциональному смыслу: вектор переменных состояния (X), вектор управляющих воздействий (U), вектор возмущающих воздействий (V), вектор управляемых параметров (Y): $Z = (X, U, V, Y)^T$. Собственно модель представляет собой систему дифференциальных уравнений первого порядка, отражающих динамику объекта: $\dot{X} = \hat{F}(X, U, V)$. Для определения установившихся режимов объекта предлагается строить также статическую форму модели в виде систем алгебраических уравнений: $F(X, U, V) = 0$. Вектор управляемых параметров зависит от цели управления и определяется уравнениями: $Y = F_Y(X, U, V)$.

Частные модели объекта управления (ОУ) и исполнительного механизма (ИМ) имеют следующий вид:

1. Модель ОУ:

$$\dot{X}_1 = \hat{F}_1(X_1, U_1, V_1); F_1(X_1, U_1, V_1) = 0. \quad (1)$$

2. Модель ИМ:

$$\dot{X}_2 = \hat{F}_2(X_2, U_2, V_2); F_2(X_2, U_2, V_2) = 0. \quad (2)$$

Параметры модели расширенного объекта управления формируются путем объединения полных множеств параметров ОУ и ИМ: $Z_3 =$

$= Z_1 + Z_2$ и разделении их по функциональному смыслу с точки зрения расширенного объекта управления: $Z_3 = (X_3, U_3, V_3, Y_3)^T$. Уравнения динамической и статической форм объединенной модели строятся на основе вектор-функций моделей ОУ и ИМ:

$$\dot{X}_3 = \begin{pmatrix} \hat{F}_1(X_3, U_3, V_3) \\ \hat{F}_2(X_3, U_3, V_3) \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_1(X_3, U_3, V_3) = 0; \\ F_2(X_3, U_3, V_3) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

После выбора управляемых параметров Y модель расширенного объекта управления дополняется и уравнениями вида: $Y = F_Y(X, U, V)$.

Далее рассмотрены предлагаемые подходы к построению уравнений указанных форм моделей.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В СКВАЖИННОЙ СИСТЕМЕ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

2.1. Общая форма модели

Жидкость в скважинной системе распределена по системе взаимосвязанных резервуаров: жидкость в НКТ, жидкость в ОК, жидкость в ЗДС. В связи с этим модель ЖСС предложено строить как объединение моделей в переменных состояния жидкостей в отдельных резервуарах.

Рассмотрим общий подход к построению модели жидкости в i -м резервуаре. В качестве параметров Z , определяющих состояние жидкости в резервуаре, предлагается рассматривать давления P и потоки Q жидкости в областях ее взаимодействия с жидкостями других резервуаров. Например, если i -й резервуар взаимодействует с j -м и k -м резервуарами, то множеством параметров, определяющим его состояние будет: $Z = (P_{ij}, Q_{ij}, P_{ik}, Q_{ik})$. Далее параметры разделяются по функциональному смыслу: переменные состояния X_i , управляющие U_i и возмущающие V_i воздействия. Учитывая, что управляющие и возмущающие воздействия являются внешними, т. е. их значения известны, то количество уравнений модели определяется вектором X_i . Динамическая форма модели представляет собой систему дифференциальных уравнений вида: $\dot{X}_i = \hat{F}_i(X_i, U_i, V_i)$. Статическая форма модели представляет собой систему алгебраических уравнений вида: $F_i(X_i, U_i, V_i) = 0$. Применим данный подход к формированию моделей отдельных резервуаров.

Жидкость в НКТ взаимодействует с жидкостью в ОК (посредством центробежного насоса (ЦН)) и жидкостью во внешней сети сбора нефти. Множество параметров состояния $Z_{\text{НКТ}} = (P_{\text{Н}}, Q_{\text{НКТ}}, P_{\text{В}}, Q_{\text{В}})$, где $Q_{\text{НКТ}}, Q_{\text{В}}$ – потоки на входе и выходе НКТ (в установившемся режиме $Q_{\text{НКТ}} = Q_{\text{В}}$), $P_{\text{Н}}$ – давление на входе НКТ (выходе ЦН), $P_{\text{В}}$ – давление на выходе НКТ (буферное давление, создаваемое внешней сетью). Функциональный смысл параметров: $U = P_{\text{Н}}, V = P_{\text{В}}, X = Q_{\text{НКТ}}$. Статическая и динамическая модели НКТ имеют вид алгебраического и дифференциального уравнений с неизвестным $Q_{\text{НКТ}}$: $F_{\text{НКТ}}(Q_{\text{НКТ}}, P_{\text{Н}}, P_{\text{В}}) = 0, \dot{Q}_{\text{НКТ}} = F(Q_{\text{НКТ}}, P_{\text{Н}}, P_{\text{В}})$.

Жидкость в ОК взаимодействует с жидкостью в НКТ (посредством центробежного насоса (ЦН)) и жидкостью в ЗДС (посредством перфорационных отверстий в призабойной зоне). Множество параметров состояния $Z_{\text{ОК}} = (P_3, Q_3, Q_{\text{НКТ}})$, где P_3 – давление в призабойной зоне ОК, Q_3 – поток в призабойной зоне. Функциональный смысл параметров: $U = Q_{\text{НКТ}}, V = Q_3, X = P_3$. Статическая и динамическая модели ОК имеют вид алгебраического и дифференциального уравнений с неизвестным P_3 : $F_{\text{ОК}}(P_3, Q_{\text{НКТ}}, Q_3) = 0, \dot{P}_3 = \hat{F}_{\text{ОК}}(P_3, Q_{\text{НКТ}}, Q_3)$.

Жидкость в ЗДС взаимодействует с жидкостью продуктивного пласта за своими пределами и жидкостью в ОК (посредством перфорационных отверстий в призабойной зоне). Множество параметров состояния $Z_{\text{ЗДС}} = (P_{\text{П}}, Q_{\text{П}}, P_3, Q_3)$, где $P_{\text{П}}$ – пластовое давление на границе ЗДС, $Q_{\text{П}}$ – поток жидкости через границу ЗДС (вследствие малости $Q_{\text{П}}$ принимаем $Q_{\text{П}} = 0$). Функциональный смысл параметров: $U = P_3, V = P_{\text{П}}, X = Q_3$. Статическая и динамическая модели ЗДС имеют вид алгебраического и дифференциального уравнений с неизвестным Q_3 : $F_{\text{ЗДС}}(Q_3, P_3, P_{\text{П}}) = 0, \dot{Q}_3 = \hat{F}_{\text{ЗДС}}(Q_3, P_3, P_{\text{П}})$.

Полная модель ЖСС как объекта управления представляет собой объединение моделей жидкостей в отдельных резервуарах. Вектор объединенных параметров имеет вид: $Z_{\text{СС}} = (Q_{\text{НКТ}}, P_{\text{Н}}, P_{\text{В}}, P_3, Q_3, P_3, P_{\text{П}})$, которые имеют следующий функциональный смысл: $U = P_{\text{Н}}, V = (P_{\text{В}}, P_{\text{П}}), X = (Q_{\text{НКТ}}, P_3, Q_3)$. В результате модель ЖСС приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} F_{\text{НКТ}}(Q_{\text{НКТ}}, P_{\text{Н}}, P_{\text{В}}) = 0; \\ F_{\text{ОК}}(P_3, Q_{\text{НКТ}}, Q_3) = 0; \\ F_{\text{ЗДС}}(Q_3, P_3, P_{\text{П}}) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{Q}_{\text{НКТ}} = \hat{F}_{\text{НКТ}}(Q_{\text{НКТ}}, P_{\text{Н}}, P_{\text{В}}); \\ \dot{P}_3 = \hat{F}_{\text{ОК}}(P_3, Q_{\text{НКТ}}, Q_3); \\ \dot{Q}_3 = \hat{F}_{\text{ЗДС}}(Q_3, P_3, P_{\text{н}}). \end{cases} \quad (6)$$

Структура модели ЖСС показана на рис.3.

Далее рассмотрены подходы к построению уравнений в моделях ЖСС.

2.2. Уравнения модели движения жидкости в насосно-компрессорной трубе

Статическая форма модели вида $F_{\text{НКТ}}(Q_{\text{НКТ}}, P_{\text{н}}, P_{\text{в}}) = 0$ может быть получена на основе формулы Пуазейля [2], выражающей поток ламинарного движения вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе круглого сечения через разность давления на ее концах:

$$Q_{\text{НКТ}} = \frac{\pi D_{\text{НКТ}}^4}{128\eta L_{\text{НКТ}}\rho} (P_{\text{НКТ Вх}} - P_{\text{НКТ Вых}}), \text{ где } \eta - \text{динамическая вязкость жидкости, } D_{\text{НКТ}}, L_{\text{НКТ}} - \text{соответственно внутренний диаметр и длина НКТ, } P_{\text{НКТ Вх}}, P_{\text{НКТ Вых}} - \text{соответственно давления жидкости на входе и выходе НКТ. Давление } P_{\text{НКТ Вх}} \text{ определяется выражением: } P_{\text{НКТ Вх}} = P_{\text{н}} - P_{\text{НКТ}} + P_{\text{Г}}, \text{ где } P_{\text{н}} - \text{давление создаваемое на выходе центробежного насоса, } P_{\text{НКТ}} - \text{давление создаваемого весом столба жидкости в НКТ, } P_{\text{Г}} - \text{давление, вызванное концентрацией газов в жидкости, способствующее понижению веса жидкости. Давление } P_{\text{НКТ Вых}} \text{ определяется так называемым буферным давлением } P_{\text{в}}, \text{ создаваемым внешней сетью на устье скважины.}$$

Учитывая приведенные соотношения, искомая статическая модель НКТ представляется уравнением вида:

$$(P_{\text{н}} - P_{\text{в}} - a_2)a_1 - Q_{\text{НКТ}} = 0, \quad (7)$$

$$\text{где } a_1 = \frac{\pi D_{\text{НКТ}}^4}{128\eta L_{\text{НКТ}}\rho}, a_2 = P_{\text{НКТ}} - P_{\text{Г}}.$$

Инерционностью жидкости в НКТ, вследствие незначительности времени переходных процессов, принято пренебречь. В системе (6) НКТ представлена уравнением (7).

2.3. УРАВНЕНИЯ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ОБСАДНОЙ КОЛОННЕ

Статическая модель движения жидкости в ОК вида $F_{\text{ОК}}(P_3, Q_{\text{НКТ}}, Q_3) = 0$ может быть построена на основе следующего соотношения: приращение количества жидкости в ОК $Q_{\text{ОК}}$ равно разнице между притоком жидкости в забойной зоне Q_3 из продуктивного пласта и оттоком жидкости $Q_{\text{НКТ}}$ через НКТ: $Q_{\text{ОК}} = Q_3 - Q_{\text{НКТ}}$. Учитывая то, что в статическом режиме количество жидкости в ОК не изменяется, искомое соотношение приобретает вид:

$$Q_3 - Q_{\text{НКТ}} = 0. \quad (8)$$

Для построения динамической модели ОК вида $\dot{P}_3 = \hat{F}_{\text{ОК}}(P_3, Q_{\text{НКТ}}, Q_3)$ воспользуемся соотношением между скоростью изменения объема $V_{\text{ОК}}$ жидкости в ОК и ее потоком: $\frac{dV_{\text{ОК}}}{dt} = Q_{\text{ОК}}$.

Далее выразим объем $V_{\text{ОК}}$ через давление P_3 жидкости в призабойной зоне используя соотношения: $V_{\text{ОК}} = H_{\text{ОК}}S_{\text{ОК}}$ и $P_3 = \rho g H_{\text{ОК}}$, где $H_{\text{ОК}}$ – высота столба жидкости в ОК, $S_{\text{ОК}}$ – площадь сечения ОК: $V_{\text{ОК}} = \frac{S_{\text{ОК}}}{\rho g} P_3$. Подставив полученное

выражение $V_{\text{ОК}}$ в исходное и выразив поток $Q_{\text{ОК}}$ через потоки $Q_3, Q_{\text{НКТ}}$, получим искомое уравнение динамической модели ОК:

$$\frac{dP_3}{dt} = a_3(Q_3 - Q_{\text{НКТ}}), \quad (9)$$

$$\text{где } a_3 = \frac{\rho g}{S_{\text{ОК}}}.$$

Управляющее воздействие

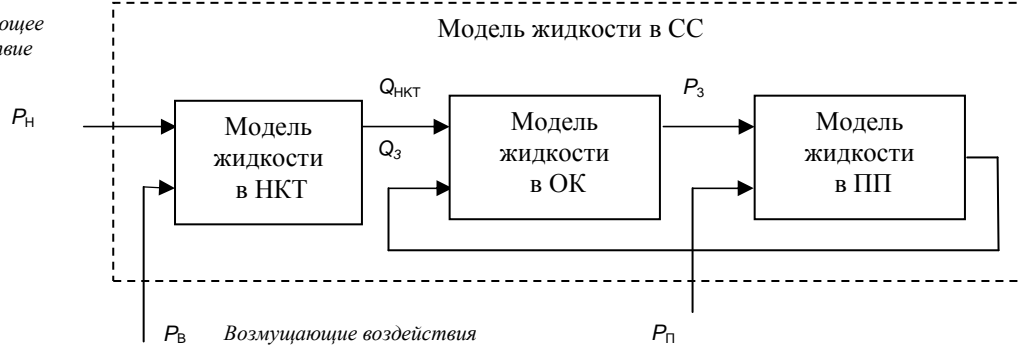


Рис. 3. Структура модели жидкости в скважинной системе

2.4. Уравнения модели движения жидкости в зоне дренирования скважины

Зона дренирования скважины (ЗДС) представляет собой резервуар цилиндрической формы, в центре которого расположена добывающая скважина. Радиус цилиндра $R_{\text{П}}$ принимается равным половине расстояния между соседними скважинами, высота цилиндра $h_{\text{П}}$ равна мощности продуктивного пласта. ЗДС непосредственно взаимодействует с ОК в призабойной зоне. Жидкость движется к скважине под действием разницы между давлением $P_{\text{П}}$ на границе ЗДС $P_{\text{П}}$ и давлением P_3 в призабойной зоне ОК. Параметрами жидкости, входящими в модель ЗДС, являются давление P_3 и поток жидкости Q_3 к скважине в призабойной зоне.

Статическая форма модели ЗДС вида $F_{\text{ЗДС}}(Q_3, P_3, P_n) = 0$ формируется на базе формулы, описывающей установившееся радиальное движение жидкости к скважине [3]:

$$(P_n - P_3)a_4 - Q_3 = 0, \quad (10)$$

где a_4 – коэффициент продуктивности пласта, определяется формулой Дюпюи [3]

$$a_4 = \frac{\eta \ln\left(\frac{R_{\text{П}}}{R_{\text{С}}}\right)}{2\pi k_{\text{пр}} h},$$

где $R_{\text{П}}$ – радиус зоны дренирования скважины, $R_{\text{С}}$ – радиус скважины, h – мощность пласта, $k_{\text{пр}}$ – коэффициент проницаемости пласта.

Инерционностью жидкости в ЗДС, вследствие незначительности постоянной времени и значительной сложности модели неустановившихся процессов в продуктивном пласте, решено пренебречь [3]. В качестве уравнения ЗДС в системе (6) используется уравнение (10).

2.5. Полная модель ЖСС

Используя вышеприведенные уравнения, статическая и динамическая модели ЖСС в форме (5) приобретают вид:

$$\begin{cases} (P_{\text{Н}} - P_{\text{В}} - a_2)a_1 - Q_{\text{НКТ}} = 0; \\ Q_3 - Q_{\text{НКТ}} = 0; \\ (P_n - P_3)a_4 - Q_3 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} (P_{\text{Н}} - P_{\text{В}} - a_2)a_1 - Q_{\text{НКТ}} = 0 \\ \frac{dP_3}{dt} = a_3(Q_3 - Q_{\text{НКТ}}); \\ (P_n - P_3)a_4 - Q_3 = 0. \end{cases} \quad (12)$$

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЭЦН КАК ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

3.1. Общая форма модели

УЭЦН представляет собой систему, состоящую из погружного асинхронного электродвигателя (ПЭД) и центробежного насоса (ЦН). В связи с этим модель вида (2) построена путем объединения моделей ПЭД и ЦН. Рассмотрим формы моделей данных объектов.

Состояние ПЭД определяется множеством параметров: $Z_D = (f, u, n, M_c)$, где u, f – действующие значения и частота 3-фазного напряжения питания; n – частота вращения вала ПЭД; M_c – момент сопротивления на валу ПЭД. Функциональный смысл параметров: $U = (u, f)$, $V = M_c$, $X = n$. Общий вид статической и динамической моделей ПЭД: $F_D = (f, u, n, M_c) = 0$, $\dot{n} = F_D(f, u, n, M_c)$.

Состояние ЦН определяется множеством параметров: $Z_H = (n, P_{\text{Н}}, Q)$, где $P_{\text{Н}}$ – давление жидкости на выходе ЦН; Q – поток жидкости через ЦН. Функциональный смысл параметров: $U = n$, $V = Q$, $X = P_{\text{Н}}$. Общий вид статической и динамической моделей ЦН: $F_H(n, P_{\text{Н}}, Q) = 0$, $\dot{P}_{\text{Н}} = F_D(P_{\text{Н}}, n, Q)$. Структура модели УЭЦН как исполнительного механизма формируется на основе объединения моделей ПЭД и ЦН. Объединенный вектор параметров имеет вид: $Z_{DH} = (f, u, n, M_c, P_{\text{Н}}, Q)$. Функциональный смысл параметров: $U = (u, f)$, $V = (M_c, Q)$, $X = (n, P_{\text{Н}})$. Искомые формы моделей УЭЦН:

$$\begin{cases} F_D(f, u, n, M_c) = 0; \\ F_H(n, P_{\text{Н}}, Q) = 0. \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \dot{n} = F_D(f, u, n, M_c); \\ \dot{P}_{\text{Н}} = F_D(P_{\text{Н}}, n, Q). \end{cases} \quad (14)$$

Структура модели УЭЦН показана на рис. 4.

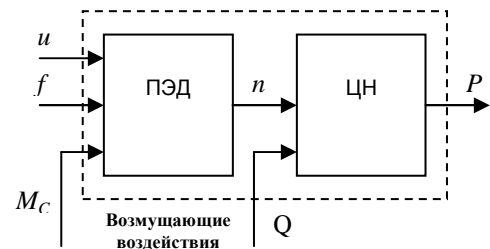


Рис. 4. Структура модели УЭЦН

Далее рассмотрим подходы к построению уравнений моделей ПЭД и ЦН.

3.2. Уравнения модели погружного электродвигателя

Статическая модель ПЭД на базе асинхронного двигателя вида $F_D = (f, u, n, M_C) = 0$ может быть сформирована на основе модифицированной формулы Клосса [4]:

$$M_D = \frac{2M_k \left(\frac{u}{u_n} \right)^2 / \left(\frac{f}{f_n} \right)^2}{\left(\frac{n_0 - n}{\Delta n_k} + \frac{\Delta n_k}{n_0 - n} \right)},$$

где M_D – момент на валу, создаваемый ПЭД; n_0 – частота вращения вала на холостом ходу; Δn_k – конструктивная постоянная асинхронного электродвигателя (абсолютное значение скольжения ротора); M_k – критический момент на валу в номинальном режиме; n_n – номинальная частота вращения вала; u_n, f_n – номинальные значения частоты и напряжения питания. Учитывая то, что в статическом режиме выполняется условие $M_D = M_C$, искомая статическая модель ПЭД приобретает вид:

$$M_C - \frac{2M_k \left(\frac{u}{u_n} \right)^2 / \left(\frac{f}{f_n} \right)^2}{\left(\frac{n_0 - n}{\Delta n_k} + \frac{\Delta n_k}{n_0 - n} \right)} = 0. \quad (15)$$

Динамическая модель ПЭД вида $\dot{n} = F_D(f, u, n, M_C)$ формируется на основе уравнения динамики вращательного движения: $\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} M$, где ω – круговая частота вращения, J – момент инерции вращающегося объекта [5]. Используя соотношения $M = M_D - M_C$, $\omega = 2\pi n$, а также формулу Клосса, получаем искомое уравнение динамической модели ПЭД:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{2\pi J} \left[\frac{2M_k \left(\frac{u}{u_n} \right)^2 / \left(\frac{f}{f_n} \right)^2}{\left(\frac{n_0 - n}{\Delta n_k} + \frac{\Delta n_k}{n_0 - n} \right)} - M_C \right]. \quad (16)$$

3.3. Уравнения модели центробежного насоса

Статическая модель ЦН вида $F_H(n, P_H, Q) = 0$ формируется на основе напорно-расходной характеристики насоса, которая аппроксимируется зависимостью [6]:

$$H_H = H_{fn} \left(\frac{n}{n_n} \right)^2 + S_f Q^2,$$

где n_n – номинальная частота вращения вала насоса, H_H – напор на выходе насоса, H_{fn} – «фиктивный» напор насоса на номинальной частоте, S_f – «фиктивное» сопротивление насоса. Выражая напор через давление $H = \frac{P}{\rho g}$, получаем

уравнение искомой статической модели:

$$\frac{P_H}{\rho g} - H_{fn} \left(\frac{n}{n_n} \right)^2 + S_f Q^2 = 0. \quad (17)$$

Вследствие относительно низкой постоянной времени переходных процессов, инерционностью ЦН в данной модели предлагается пренебречь. В качестве уравнения насоса в системе (14) применяется уравнение (17)

3.4. Полная модель УЭЦН

Искомые статическая и динамическая модели УЭЦН, полученные на основе объединения приведенных выше моделей ПЭД и ЦН принимают вид:

$$\begin{cases} M_C - 2M_k \left(\frac{u}{u_n} \right)^2 / \left(\frac{f}{f_n} \right)^2 / \left(\frac{n_0 - n}{\Delta n_k} + \frac{\Delta n_k}{n_0 - n} \right) = 0; \\ \frac{P_H}{\rho g} - H_{fn} \left(\frac{n}{n_n} \right)^2 + S_f Q^2 = 0. \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{1}{2\pi J} \left[\frac{2M_k \left(\frac{u}{u_n} \right)^2 / \left(\frac{f}{f_n} \right)^2}{\left(\frac{n_0 - n}{\Delta n_k} + \frac{\Delta n_k}{n_0 - n} \right)} - M_C \right]; \\ \frac{P_H}{\rho g} - H_{fn} \left(\frac{n}{n_n} \right)^2 + S_f Q^2 = 0. \end{cases} \quad (19)$$

4. ОБЪЕДИНЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ И ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

Для объединения моделей ЖСС и УЭЦН введена дополнительная модель – модель момента сопротивления M_C на валу ПЭД, который ранее рассматривался как возмущающее воздействие ПЭД. Момент M_C представляет собой основную нагрузку для ПЭД, создаваемую ЦН, и может быть выражен через параметры режима насоса с помощью условия равенства полезных

мощностей ПЭД (N_D) и ЦН (N_H): $N_D = N_H$. [6]. Указанные мощности определяются следующими соотношениями [6]: $N_D = M_C 2\pi n$; $N_H = \frac{Q_H \Delta P}{102\eta_H} 10^3$, где Q_H – поток жидкости через насос, $\Delta P = P_H - P_{HВх}$ – разница между давлениями на входе $P_{HВх}$ и выходе P_H насоса; η_H – К.П.Д. насоса. На основе данных соотношений выражение для M_C имеет вид:

$$M_C = \frac{Q_{HKT}(P_H - P_{HВх})}{102\eta_H 2\pi n} 10^3.$$

Давление $P_{HВх}$ определяется глубиной h_H погружения ЦН и может быть выражено через параметры жидкости скважинной системы на основе последовательного применения соотношений:

$$P_{HВх} = h_H \rho g; h_H = H_{OK} - (L_{OK} - L_{HKT});$$

$$H_{OK} = \frac{P_3}{\rho g}; P_3 = \frac{Q_3}{k_{np}} - P_n;$$

$$P_{HВх} = \left(\frac{Q_3}{k_{np}} - P_n \right) - (L_{OK} - L_{HKT}) \rho g.$$

В результате искомое выражение для M_C приобретает вид:

$$M_C = \frac{Q_{HKT} \left(P_H - \left(\frac{Q_3}{k_{np}} - P_n \right) - (L_{OK} - L_{HKT}) \rho g \right)}{102\eta_H 2\pi n} 10^3. \quad (20)$$

Объединенный вектор параметров моделей ЖСС и УЭЦН, в котором M_C , входящий в модель УЭЦН, выражен через параметры (Q_{HKT}, P_H, Q_3, P_n) , имеет вид: $Z_{DH} = (f, u, n, P_H, Q_{HKT}, P_H, P_{В}, P_3, Q_3, P_n)$. Функциональный смысл параметров: $U = (u, f)$; $V = (P_n, P_{В})$; $X = (P_H, P_3, Q_{HKT}, Q_3, n)$.

С учетом вышеприведенных соотношений объединенная модель расширенного объекта управления приобретает вид:

$$\begin{cases} F_D(f, u, n, Q_{HKT}, P_H, Q_3, P_n) = 0; \\ F_H(n, P_H, Q_{HKT}) = 0; \\ F_{HKT}(Q_{HKT}, P_H, P_{В}) = 0; \\ F_{OK}(P_3, Q_{HKT}, Q_n) = 0; \\ F_{ЗДС}(Q_3, P_3, P_n) = 0; \\ M_C = F_C(Q_{HKT}, P_H, P_n, n). \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \dot{n} = \hat{F}_D(f, u, n, Q_{HKT}, P_H, Q_3, P_n); \\ F_D(P_H, n, Q) = 0; \\ F_{HKT}(Q_{HKT}, P_H, P_{В}) = 0; \\ \dot{P}_3 = \hat{F}_{OK}(P_3, Q_{HKT}, Q_n); \\ F_{ЗДС}(Q_3, P_3, P_n) = 0; \\ M_C = F_C(Q_{HKT}, P_H, n). \end{cases} \quad (22)$$

После выбора цели управления и вектора управляемых параметров Y модель (21)–(22) дополняется уравнениями $Y = F_Y(X, U, V)$.

Структурная схема модели расширенного объекта управления показана на рис. 5.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

С целью оценки адекватности разработанных моделей был проведен ряд вычислительных экспериментов, отражающих реакцию объекта управления на различные управляющие и возмущающие воздействия. Особенностью модели НС является то, что объект управления и исполнительный механизм имеют разные порядки постоянных времени, что вносит определенные сложности при выполнении вычислительных экспериментов. Для решения данной проблемы предложен способ комбинирования статических и динамических моделей подсистем. Так, при моделировании динамики УЭЦН применялась модель, состоящая из динамической модели УЭЦН и статической модели ЖСС. При моделировании динамики ЖСС применялась динамическая модели ЖСС и статическая модель УЭЦН. В качестве примера приведены результаты моделирования процессов в НС при ее вводе и выводе из заданного режима добычи. На рис. 6, а показаны процессы включения (разгона, $U(t_0) = (f = f_n, u = u_n)$) и выключения (остановки, $U(t_k) = (f = 0, u = 0)$) УЭЦН. На рис. 6, б показаны процессы движения жидкости скважинной системы после включения (разгона и выключения) УЭЦН при постоянном пластовом давлении.

Результаты вычислительных экспериментов показали достаточно высокую адекватность разработанных моделей и возможность их эффективного применения для решения задач синтеза алгоритмов управления. Результаты синтеза алгоритмов управления НС на основе разработанных моделей выходят за рамки данной статьи вследствие ограниченности ее объема.

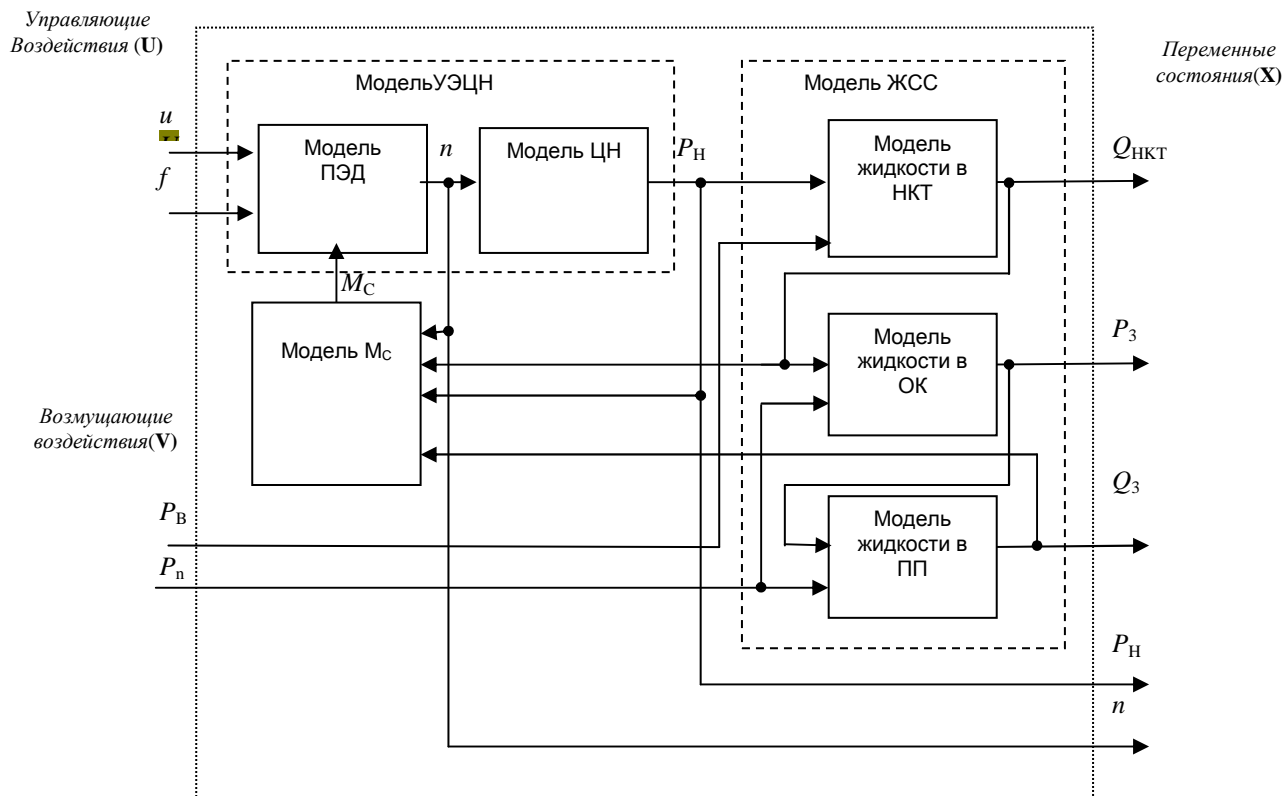


Рис. 5. Структура модели расширенного объекта управления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований построены статические и динамические модели процессов протекающих в нефтедобывающих скважинах, основанные на современных представлениях гидродинамики и электромеханики. Модели отличаются тем, что форма их представления соответствует требованиям, предъявляемым к моделям объектов управления современной теорией автоматического управления. Это обеспечивает возможность применения эффективных методов синтеза алгоритмов автоматического управления процессами нефтедобычи для программирования контроллеров САУ НС. В частности, разработаны модели в форме переменных состояния для жидкости в скважинной системе как объекта управления, установки электроцентробежного насоса как исполнительного механизма, а также их объединенная модель как расширенного объекта управления. Проведенные вычислительные эксперименты показали достаточно высокую адекватность мо-

делей и их эффективность как инструментов синтеза алгоритмов управления процессами в нефтедобывающих скважинах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. Теоретическая физика: т. VI. М.: Наука, 1986. 736 с.
3. Хисамутдинов Н. И. Проблемы сохранения продуктивности скважин и нефтенасыщенных коллекторов в заключительной стадии разработки. СПб.: Недра, 2007.
4. Федосов Ф.Б. Простые динамические модели асинхронных двигателей. [Электронный ресурс]. (http://model.exponenta.ru/bt/bt_354_AD_MechDin_Model.htm).
5. Ключев В. И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
6. Ломакин А. А. Центробежные и осевые насосы. М.: Машиностроение, 1966. 364 с.

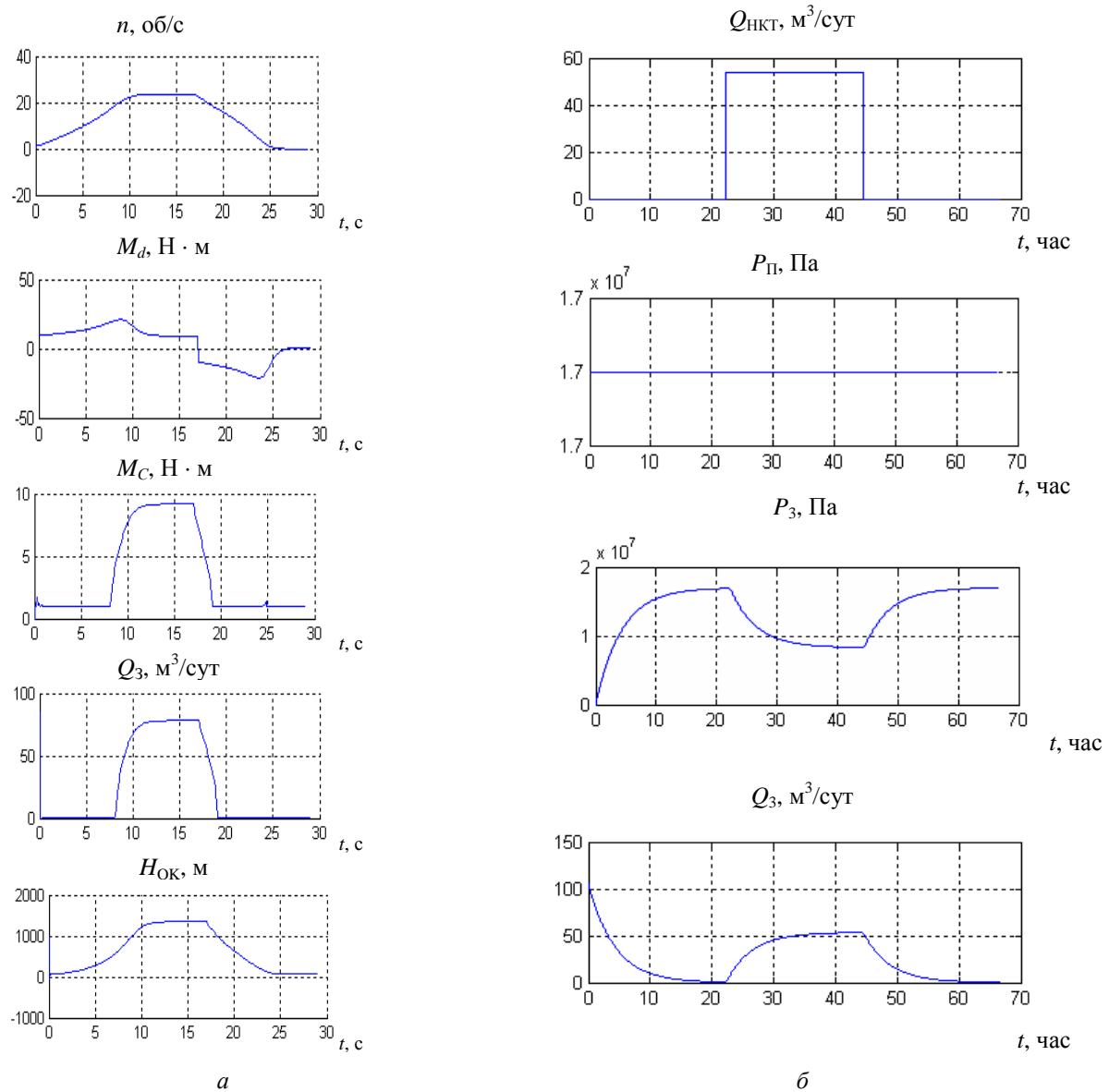


Рис. 6. Моделирование процессов: а – включения УЭЦН; б – ввода и вывода ЖСС из режима добычи

ОБ АВТОРАХ

Нугаев Ильдар Фидаилевич, проф. каф. электроники и биомедицинских технологий. Дипл. инженер электронной техники (УАИ, 1985). Д-р техн. наук по автоматизации технологических процессов (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. моделирования и автоматического управления сложными системами.

Искужин Рустем Валерьевич, асп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологии по электронике и микроэлектронике (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. интеллектуальных систем управления.