

УДК 621.313.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

А.О. Смирнов, С.В. Ланграф, В.С. Казаков\*, Р.Ф. Бекишев

Томский политехнический университет  
 \*ООО НПО «Сибирский машиностроитель», г. Томск  
 E-mail: shurikk@sibmail.com

*Исследован частотно-управляемый асинхронный электропривод запорной арматуры при различных температурах окружающей среды. Показано влияние температуры на механические характеристики электропривода. Предложена имитационная модель, учитывающая влияние температуры на работу элементов электропривода. Даны рекомендации по улучшению эксплуатационных характеристик редуктора.*

### Ключевые слова:

*Система автоматического управления, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, низкие температуры, устойчивая работа.*

### Key words:

*Automatic-control system, induction motor, frequency converter, low temperatures, quiescent operation.*

В последнее время системы электропривода прочно занимают лидирующее место среди приводных устройств и обеспечивают бесперебойную и надежную работу механизмов во многих областях техники. Функциональные возможности и эксплуатационные параметры современных электроприводов во многом определяются характеристиками применяемых систем управления. Современный асинхронный электропривод реализован на базе силовой полупроводниковой техники с применением микропроцессорного управления. Его возможности позволяют организовать регулирование выходных координат электропривода в широком диапазоне, с высоким быстродействием и высокой точностью.

Электропривод запорной арматуры магистральных нефтяных трубопроводов представляет собой сложный мехатронный модуль, объединяющий в своем составе систему управления, силовой преобразователь, асинхронный двигатель и редуктор волнового типа. В качестве силового преобразователя может использоваться преобразователь частоты или тиристорный регулятор напряжения. Система управления должна обеспечивать требуемые режимы эксплуатации запорной арматуры, адекватную реакцию электропривода на изменение внешних условий, поддержку защитных функций и коммуникаций с другими устройствами, диагностику состояния всех элементов электропривода.

Электроприводы запорной арматуры магистральных трубопроводов эксплуатируются в различных географических широтах с большими перепадами температуры окружающей среды. Особенно большое влияние на работоспособность электропривода оказывают низкие температуры  $-(50...60)^\circ\text{C}$  в период запуска агрегатов после длительной остановки. Температура окружающей среды и связанная с ней температура проходящей жидкости (нефти) оказывают определяющее влияние на работоспособность и ресурс работы всех элементов электропривода: силового преобразовате-

ля, асинхронного двигателя, системы управления, механического преобразователя-редуктора, задвижки запорной арматуры.

Эффективность работы механической части электропривода (редуктора и задвижки) определяется давлением и объемом пропускаемой жидкости, потерями энергии на трение в подвижных соединениях и, как следствие, интенсивностью изнашивания деталей [1].

Существенное влияние на механические характеристики электропривода оказывает изменение активных сопротивлений статора и ротора асинхронного двигателя при изменении температуры окружающей среды в широком диапазоне.

Для надежной работы электронных блоков преобразователя и системы управления электроприводом требуется встроенная система контроля и диагностики с обратной связью по температуре.

Таким образом, для обеспечения устойчивой работы электропривода запорной арматуры в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды необходимы учет параметров всех элементов электропривода (запорной арматуры, редуктора, асинхронного двигателя, силового преобразователя) и разработка системы управления с обратной связью по температуре [2].

В большинстве электроприводов запорной арматуры применяется частотно-регулируемый асинхронный короткозамкнутый двигатель.

Для исследования электродвигателя разработана математическая и имитационная модели асинхронного двигателя (АД) с учетом следующих допущений:

1. Не учитываются потери в стали.
2. Исследуется трёхфазный симметричный режим работы двигателя.
3. Напряжения на выходе преобразователя частоты (ПЧ) принимаются строго синусоидальной формы.
4. Пренебрегается влияние силовым каналом между АД и ПЧ.

Для исследования динамических режимов работы системы была использована классическая Т-образная схема замещения АД [3].

Процессы в АД описываются системой векторных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} U_s &= R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt}, \\ U_r &= R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt}, \\ \psi_s &= L_s I_s + L_m I_r, \\ \psi_r &= L_r I_r + L_m I_s, \\ M &= \frac{3}{2} z_p (\psi_s \cdot I_s), \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} (M - M_c). \end{aligned}$$

Здесь  $U_s, U_r, I_s, I_r, \psi_s, \psi_r$  – двухэлементные векторы напряжений, токов и потокосцеплений, представленные в ортогональной (двухфазной) системе координат в виде составляющих по координатным осям. Механические параметры системы представлены переменными:  $J$  – момент инерции;  $\omega_r$  – частота вращения ротора;  $z_p$  – число пар полюсов;  $M$  и  $M_c$  – электромагнитный момент и момент нагрузки.

В ходе математических преобразований получаем систему скалярных уравнений:

$$\begin{aligned} p i_{s\alpha} &= \frac{1}{L_e} (u_{s\alpha} - R_e i_{s\alpha} + K_r \omega_r z_p \psi_{r\beta} + K_r A_r \psi_{r\alpha}), \\ p i_{s\beta} &= \frac{1}{L_e} (u_{s\beta} - R_e i_{s\beta} - K_r \omega_r z_p \psi_{r\alpha} + K_r A_r \psi_{r\beta}), \\ p \psi_{s\alpha} &= R_r K_r i_{s\alpha} - A_r \psi_{r\alpha} - \omega_r z_p \psi_{r\beta}, \\ p \psi_{s\beta} &= R_r K_r i_{s\beta} - A_r \psi_{r\beta} + \omega_r z_p \psi_{r\alpha}, \\ M &= \frac{3}{2} z_p K_r (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}), \\ p \omega_r &= \frac{1}{J} (M - M_c). \end{aligned}$$

На основе данной системы уравнений с использованием пакета MATLAB Simulink [4] была создана имитационная модель электропривода с волновым редуктором с использованием двухфазного АД в неподвижной системе координат, рис. 1.

Имитационная модель базируется на определенных ранее параметрах схемы замещения асинхронной машины с учетом влияний температурных изменений и настроенными регуляторами тока, скорости и потокосцепления. С использованием подхода [5] проведен анализ динамических характеристик АД при понижении температуры, рис. 2.

Как видно из рис. 2, критический и пусковой моменты АД возрастают при снижении температуры окружающей среды за счет уменьшения активных сопротивлений статора и ротора.

На этапе разработки системы адаптивного управления для оценки степени влияния температурных изменений на величину выходного момента АД проводились исследования с применением аппарата имитационного моделирования и экспериментальной установки.

На экспериментальной установке проведены исследования механических характеристик электропривода при его работе на фиксированных значениях температуры окружающей среды (+20; +10; -10; -20; -30; -40; -60) °С при частотах питающей сети 10; 20; 30; 40; 50 Гц. В каждом случае производился расчет механических характеристик по уточненной формуле Клосса.

В ходе экспериментальных исследований выявлены зависимости влияния температурных изменений на динамические характеристики асинхронного двигателя.

Результаты экспериментальных исследований на частотах от 50 до 7 Гц приведены на рис. 3.

В электронном блоке ESD-VCX электропривода «Гусар» при достижении температуры ниже -13 °С автоматически включается датчик подогрева блока, который периодически отключается при повышении температуры до -9 °С, рис. 4. При температурах от +20 и до -60 °С подогрев осуществля-

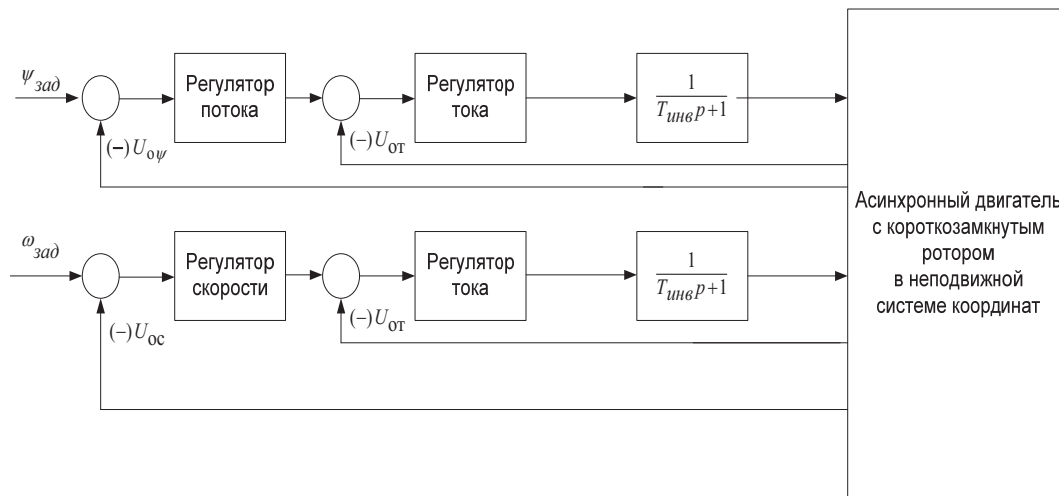


Рис. 1. Структурная схема системы автоматического управления регулируемого электропривода «Гусар» с учетом влияния температуры окружающей среды в MATLAB Simulink

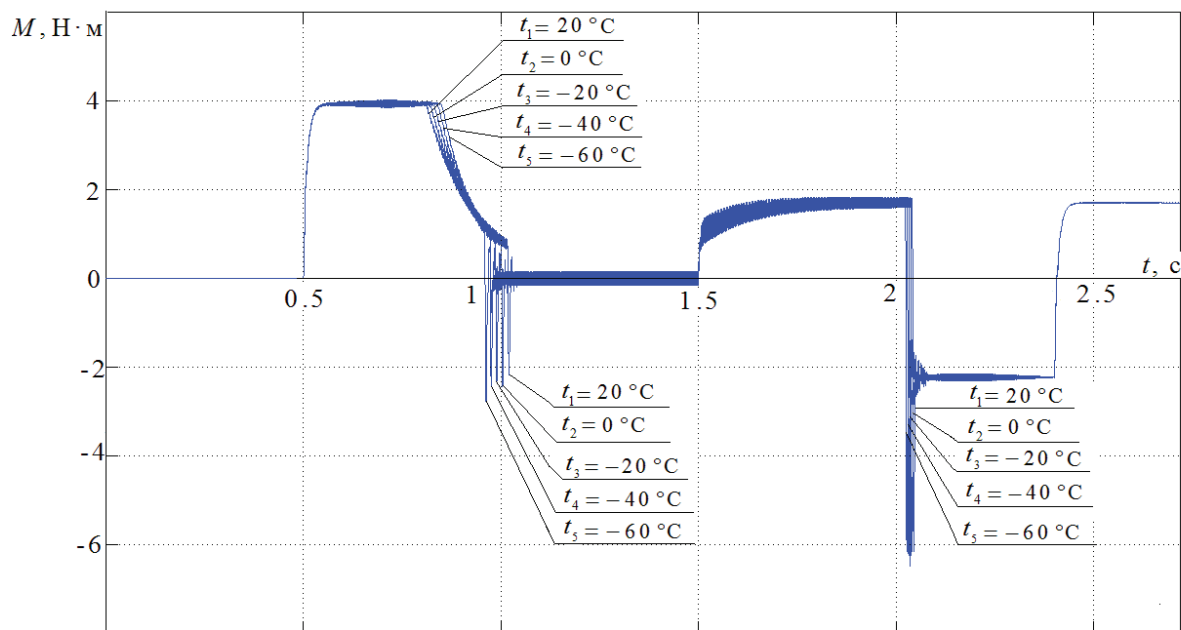


Рис. 2. Переходный процесс по моменту при пуске на холостом ходу, последующем набросе нагрузки полном останове при частоте 50 Гц в температурном интервале от +20 до -60 °С

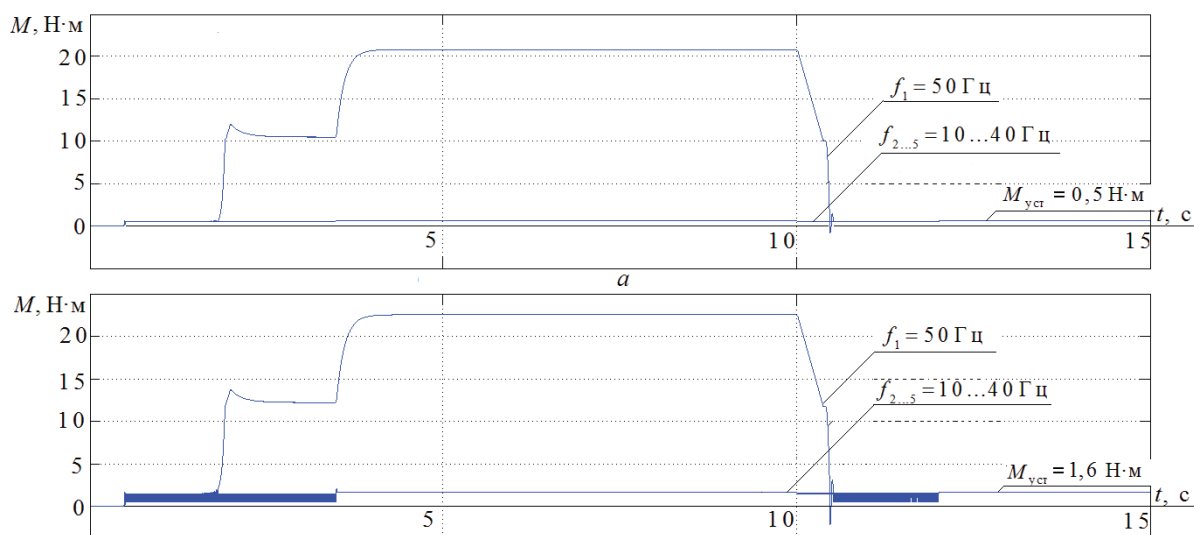


Рис. 3. Переходные процессы по установившемуся моменту на выходе асинхронного электропривода: а) с компенсацией и б) без компенсации по моменту потерь в редукторе электропривода «Гусар» при пуске на холостом ходу, последующем набросе нагрузки, полном останове в диапазоне частот от 10 до 50 Гц и температуре от +20 до -60 °С

ется непрерывно, что обеспечивает работу блока в диапазоне температуры от +20 до -60 °С.

#### Выводы

1. Исследована модель асинхронного электропривода запорной арматуры с электронным блоком управления ESD-VCX и волновым редуктором в температурном интервале от 20 до -60 °С, полученная на основе дифференциальных уравнений, позволяющая получать характеристики переходных процессов.
2. На основании полученных характеристик переходных процессов показано, что при понижении температуры повышается пусковой момент

за счет снижения активных сопротивлений обмоток электродвигателя.

3. При использовании датчика интенсивности в составе модели был реализован цикл работы электропривода: плавный пуск – наброс нагрузки – останов. Снятые характеристики свидетельствуют о том, что значение момента нагрузки на валу электродвигателя поддерживается постоянным во всем температурном интервале от 20 до -60 °С.
4. Экспериментально снятые временные зависимости температуры внутри электронного блока ESD-VCX электропривода «Гусар» показывают, что при снижении температуры до -15 °С вклю-

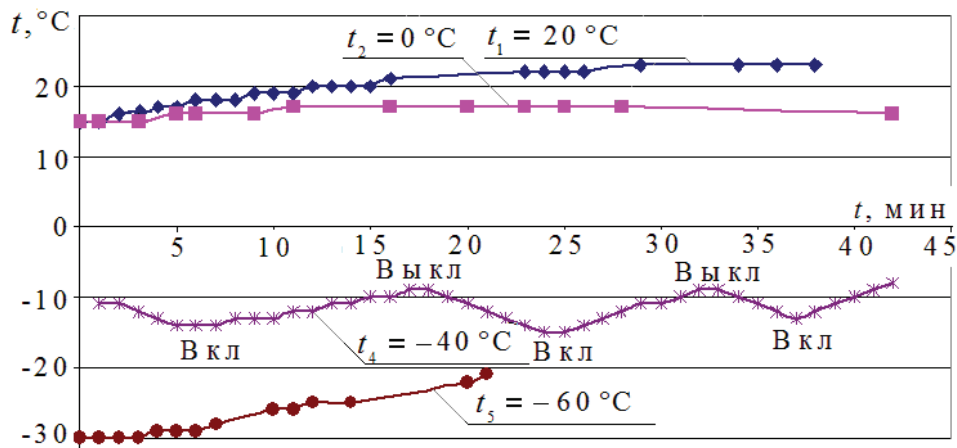


Рис. 4. Температурная зависимость работы электронного блока ESD-VCX электропривода «Гусар»

чается система обогрева, позволяющая обеспечить допустимую температуру работы полупроводниковых структур. Таким образом, элек-

тронный блок работоспособен при любых рабочих температурах и его характеристики не влияют на работу электропривода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мустафин Ф.М. Трубопроводная арматура. – Уфа: ГУП РБ УПК, УГНТУ, 2007. – 326 с.
2. Гошко А.И. Арматура трубопроводная целевого назначения. Выбор. Эксплуатация. Ремонт. – М.: Машиностроение, 2003. – 432 с.
3. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001. – 274 с.
4. Каракулов А.С., Ланграф С.В. Разработка системы управления электроприводом запорной арматуры методом разделения ма-

5. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
6. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.

Поступил 01.09.2010 г.