

УДК 621.313.2

DOI:10.17213/0136-3360-2016-4-41-48

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

А.О. Смирнов, В.Г. Букреев, А.Э. Зубреков

Томский политехнический университет. Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Рассмотрено влияние отрицательной температуры окружающей среды на параметры асинхронного электропривода с волновым редуктором. Представлены: сравнительный анализ различных фирм-производителей асинхронных частотно-регулирующих электроприводов по основным параметрам, которые существенно изменяются при перепаде температуре от +20 до -60 °С; сравнительные результаты теоретических и экспериментальных исследований основных параметров (скорость, ток, момент) асинхронного электропривода запорной арматуры, работающего в условиях низких температур окружающей среды. Исследован и предложен оптимальный вариант высококонсистентной смазки, позволяющей сократить значение момента потерь в механической части электропривода (редуктор). Даны рекомендации по улучшению динамических характеристик электропривода при низких температурах окружающей среды.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, волновой редуктор, низкие температуры, параметры асинхронного электродвигателя.

В НАСТОЯЩЕЕ 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 трубопроводов представляет собой сложный мехатронный модуль, объединяющий в своем составе систему управления, силовой преобразователь, асинхронный двигатель и редуктор. 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.

Электропривода запорной арматуры магистральных трубопроводов эксплуатируются в различных географических широтах с большими контрастами температуры окружающего воздуха. Особенно большое влияние на работоспособность электропривода оказывают низкие температуры (-50 ... 60 °С) в период запуска агрегатов после их длительной остановки. Условия эксплуатации, особенно температура окружающей среды и связанная с ней температура проходящей жидкости оказывают определяющее влияние на работоспособность и ресурс работы всех элементов электропривода: силового преобразователя, асинхронного двигателя, системы управления, механического преобразователя – редуктора, задвижки запорной арматуры.

Эксплуатация асинхронных электроприводов (АЭП) промышленного оборудования в условиях низкой температуры окружающей среды сопровождается значительным изменением параметров двигателя и редуктора, обеспечивающего передачу механической энергии исполнительному механизму. Известно, что в результате снижения температуры окружающей среды изменяется активное сопротивление роторной обмотки асинхронного двигателя (АД), которое оказывает существенное влияние на механические характеристики электропривода. Наряду с этим, в современных АЭП с частотным преобразователем проявляется эффект вытеснения тока в стержнях ротора асинхронного двигателя, при-

водящий к изменению его активного сопротивления [2].

Кроме того, значительное изменение конструктивных характеристик элементов редуктора и свойств смазки при низких температурах приводит к значительному увеличению статического момента сопротивления механической нагрузки электропривода [3].

Анализ основных характеристик некоторых типов электроприводов (табл. 1), допускающих функционирование при низкой температуре окружающей среды, показывает, что наиболее эффективным электроприводом данного класса является АЭП «Гусар» (ООО НПО «Сибирский Машиностроитель» (ООО «Сибмаш») (г. Томск).

Следует отметить, что электропривод типа «Гусар» широко используется в качестве исполнительного привода для перемещения задвижек магистральных нефте- и газопроводов, расположенных в климатических зонах Крайнего Севера с резкими изменениями температуры. Так, экспериментальные исследования данного электропривода показали уменьшение времени переход-

ного процесса скорости АЭП примерно на 20 % при изменении температуры окружающей среды от +20 до -60 °С [4].

Для компенсации нежелательных явлений, возникающих в исполнительном двигателе и редукторе запорной арматуры при низких температурах окружающей среды, с целью обеспечения качественных показателей движения исполнительного механизма промышленного оборудования, необходимо принять определенные технические решения и меры, направленные на придание адаптивных свойств системе управления электропривода.

При эксплуатации электроприводов запорной арматуры в условиях низких температур в составе запорной арматуры крайне важен параметр стабилизации моментного усилия на валу асинхронного двигателя (рис. 1).

На этапе разработки системы адаптивного управления оценка степени влияния температурных изменений на величину выходного момента асинхронного двигателя проводилась на имитационных моделях и экспериментальной установке (рис. 2).

Таблица 1

Характеристики электроприводов

Основные характеристики	«Гусар» ООО «Сибмаш» (г. Томск)	«AUMA» (Германия)	«ТЭП» (г. Тула)	«ROTORK» (Германия)
Время разгона, с	3	5	12	7
Точность, %	5	10	20	10
Диапазон регулирования, Гц	10÷50	10÷50	10÷50	10÷50
Температурный диапазон работы, °С	от -50 до +50	от -40 до +70	от -45 до +50	от -40 до +70

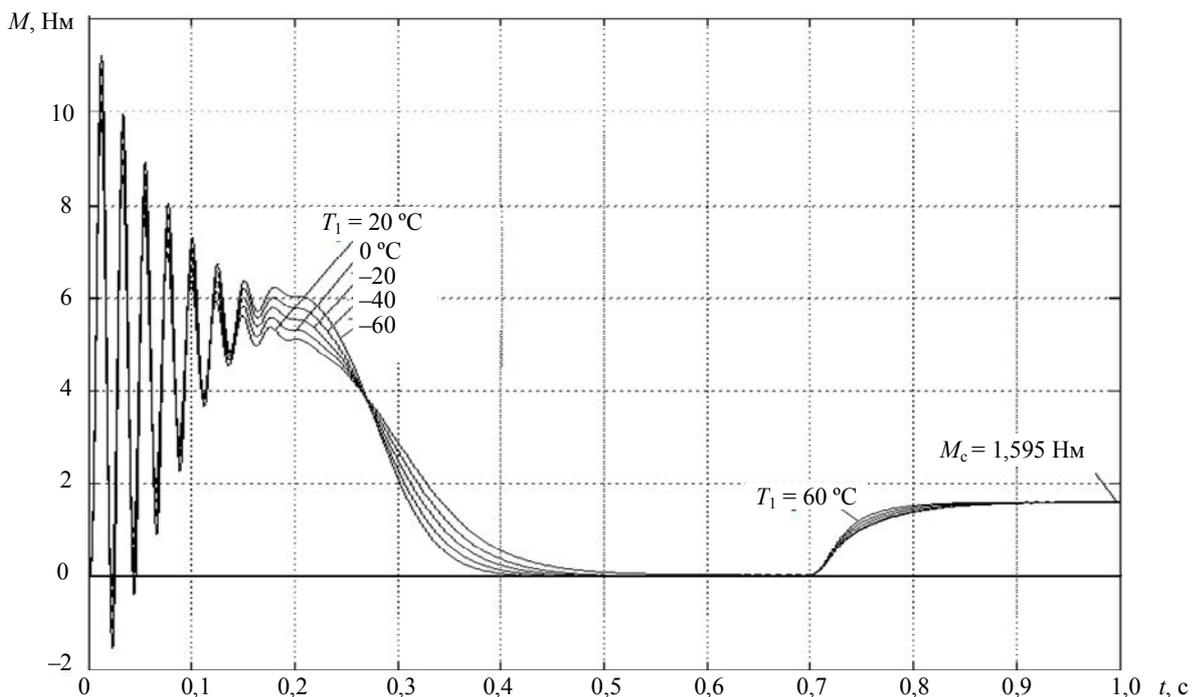


Рис. 1. Переходный процесс момента АД при пуске и набросе нагрузки при снижении температуры

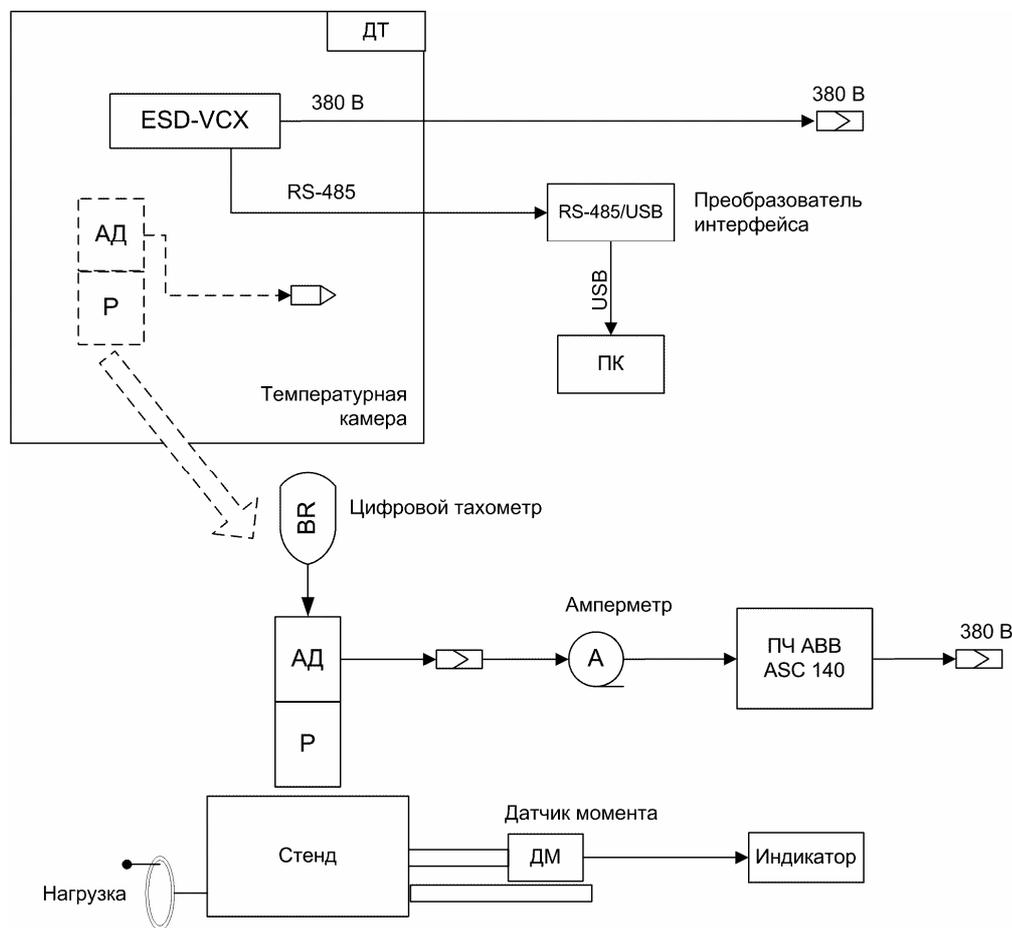


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Результаты исследований имитационного моделирования получены в виде статических и динамических характеристик, которые отражают свойства смазки в редукторе электропривода при низких температурах окружающей среды ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) [8].

Посредством математических вычислений произведен расчет активного сопротивления статорной и роторной обмоток АД (табл. 2), которые изменяются в процессе снижения температуры.

Таблица 2

Изменение параметров схемы замещения АД в зависимости от температуры окружающей среды

Параметры	Температура, $^{\circ}\text{C}$				
	20	0	-20	-40	-60
R_1 , Ом	30,864	28,443	26,023	23,602	21,181
R'_2 , Ом	29,09	26,895	24,699	22,504	20,308

В соответствии с данными табл. 2 получена зависимость (рис. 3) активного сопротивления роторной обмотки асинхронного электродвигателя от изменения температуры окружающей

среды и частоты приложенного к обмоткам статора напряжения.

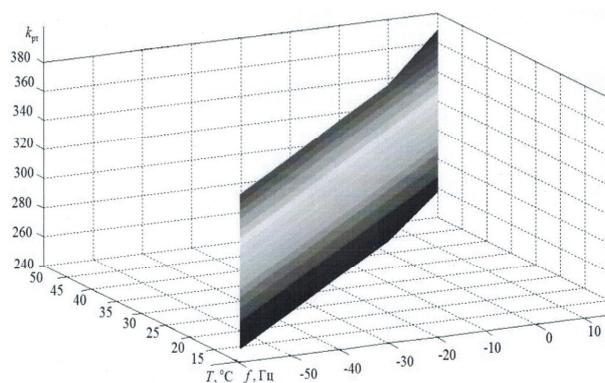


Рис. 3. Зависимость изменения активного сопротивления роторной обмотки от температуры окружающей среды и частоты приложенного к обмоткам статора напряжения (+20, 0, -20, -60 $^{\circ}\text{C}$)

Данная зависимость позволяет количественно определить степень влияния температурных изменений на работу АД.

В диапазоне скольжений АД от 0 до 1 построены механические характеристики $n = f(M_{ад})$ при нормальных условиях с учетом влияния эффекта вытеснения тока в стержнях ротора при частоте $f_{1H} = 50$ Гц и температуре окружающей среды +20, 0, -20, -40 и -60 $^{\circ}\text{C}$ (рис. 4).

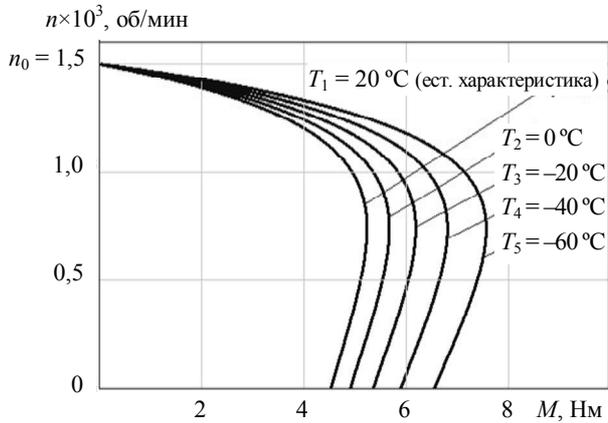


Рис. 4. Механические характеристики АД с учетом влияния эффекта вытеснения тока в стержнях ротора при понижении температуры

Результаты исследований длительности переходного процесса при различной температуре окружающей среды сведены в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость времени переходного процесса от температуры

Время $t_{\text{пр}}, \text{ с}$	Температура, $^\circ\text{C}$				
	20	0	-20	-40	-60
	0,365	0,345	0,328	0,317	0,308

Как следует из рис. 5, длительность переходных процессов уменьшается при снижении температуры. Это происходит благодаря увеличению момента (рис. 6), развиваемого на валу АД вследствие уменьшения сопротивления ротора.

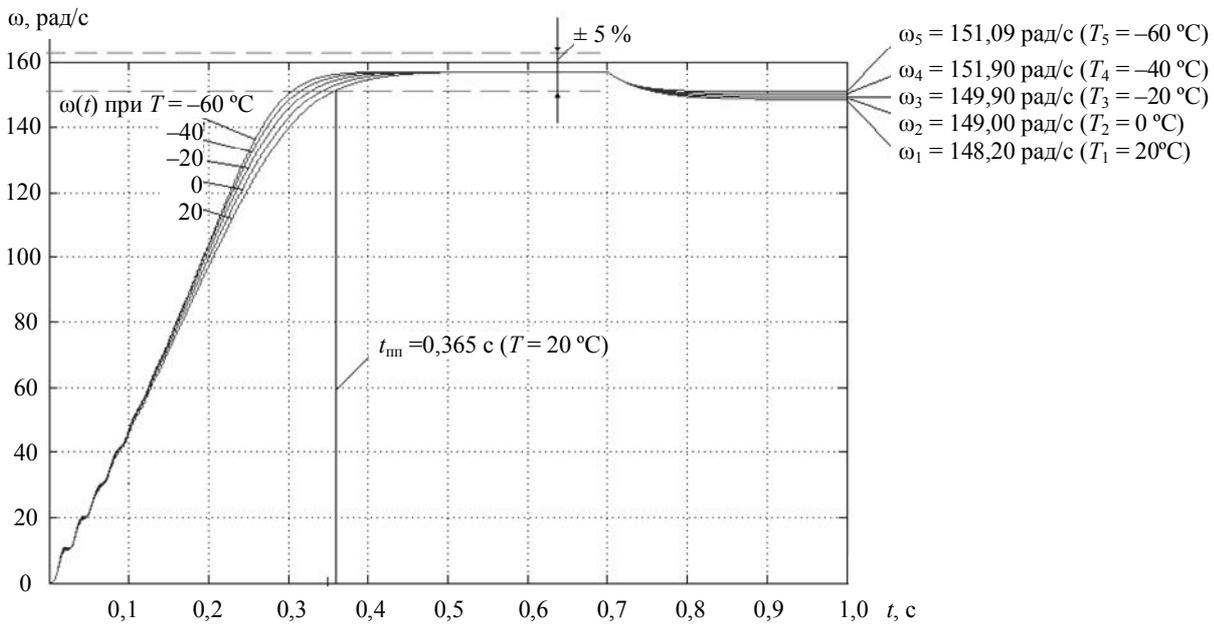


Рис. 5. Переходный процесс скорости при пуске и набросе нагрузки АД при снижении температуры

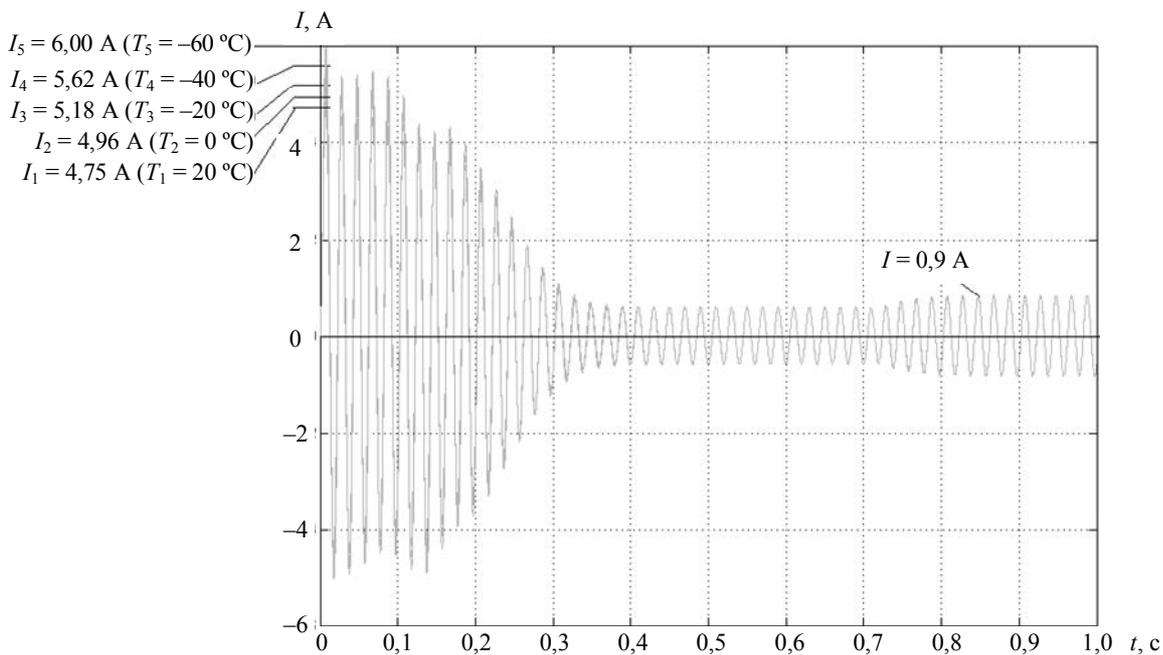


Рис. 6. Переходный процесс тока при пуске и набросе нагрузки АД при снижении температуры

От качества смазки зависит момент холостого хода в редукторе асинхронного электропривода при различных температурах. При использовании традиционной смазки момент холостого хода составляет 1,4 Нм, при использовании смазки типа ВНИИНП-286М ТУ38-101950 [5] можно уменьшить момент холостого хода до 1,1 Нм (рис. 7).

вале работы асинхронного электропривода остается неизменным и равен 1,1 Нм. Данное значение достигается в температурном диапазоне от + 20 до – 60 °С. По результатам исследований смазки была получена зависимость момента холостого хода в редукторе волнового типа асинхронного электропривода в температурном диапазоне от + 20 до – 60 °С.

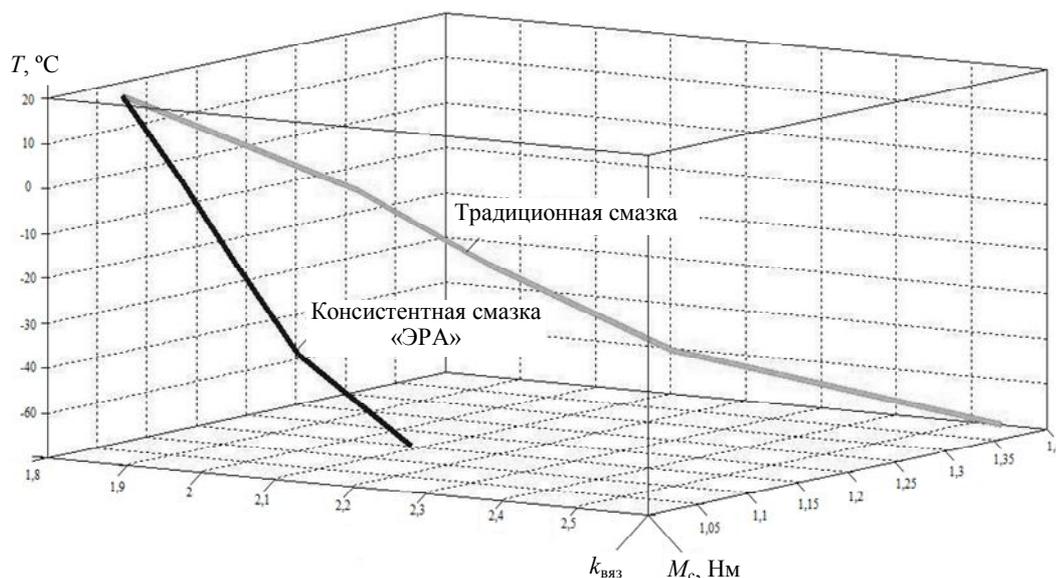


Рис. 7. Зависимость $M_c = f(k_{\text{вяз}}, T, ^\circ\text{C})$ при использовании традиционной смазки и консистентной смазки «ЭРА»

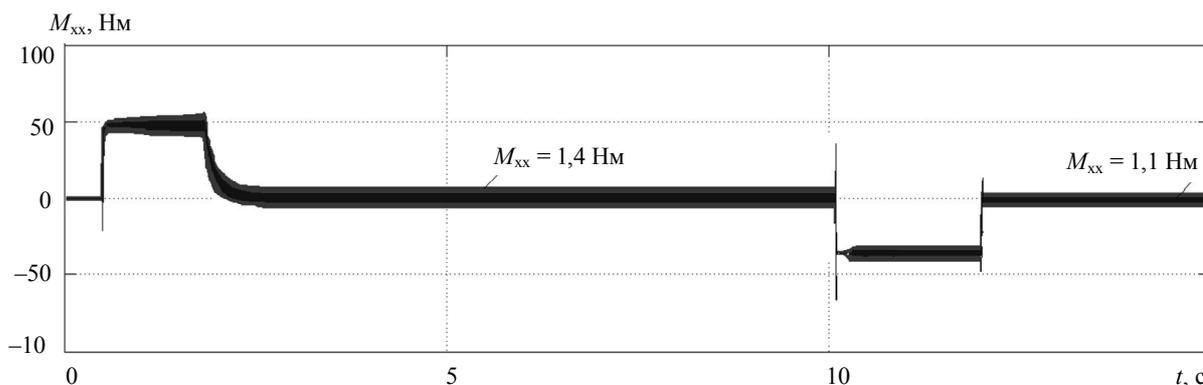


Рис. 8. Момент холостого хода редуктора волнового типа (при использовании смазки типа ВНИИНП-286М ТУ38-101950, и при использовании традиционных смазок)

Прогрессивным техническим решением является использование в электроприводе «Гусар» редуктора волнового типа, значительно повышающий КПД передачи механического усилия. Здесь следует отметить удачное применение смазки типа ВНИИНП-286М ТУ38-101950, характеристики которой слабо зависят от температурных условий ее эксплуатации [6].

Из рис. 7 видно, что при использовании смазки типа ВНИИНП-286М ТУ38-101950 момент холостого хода на всем временном интер-

На основании исследований установлено, что при использовании традиционных смазок при температуре –60 °С, значение момента потерь (рис. 8) в редукторе превышает максимально допустимое значение момента на выходном валу асинхронного электродвигателя на 27 %, что является недопустимым.

Кроме температурных изменений на выходной момент асинхронного двигателя (рис. 9) непосредственным образом влияет эффект вытеснения токов в стержнях ротора [9].

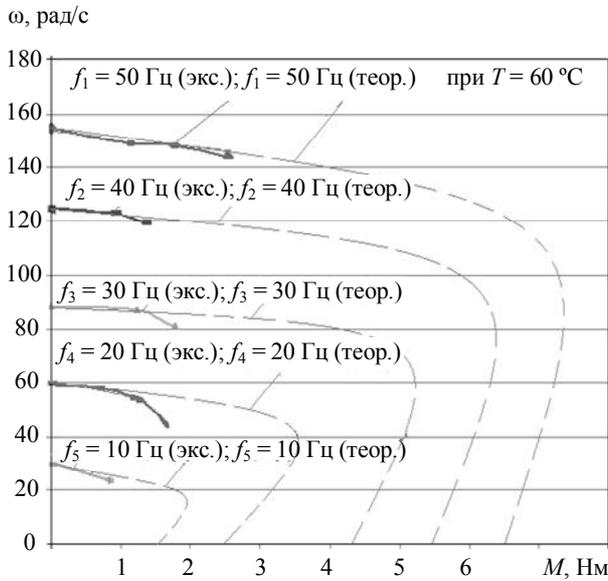


Рис. 9. Механическая характеристика ЭП при температуре $T = -60\text{ }^\circ\text{C}$ на разных частотах

Анализ графиков показывает, что при работе в диапазоне температур окружающей среды от 0 до $+20\text{ }^\circ\text{C}$ нагрев внутри блока происходит за счёт теплового излучения от электронных компонентов. Динамика изменения температуры (рис. 10) показывает, что установившееся значение температуры внутри блока на несколько градусов превышает температуру окружающей среды [10].

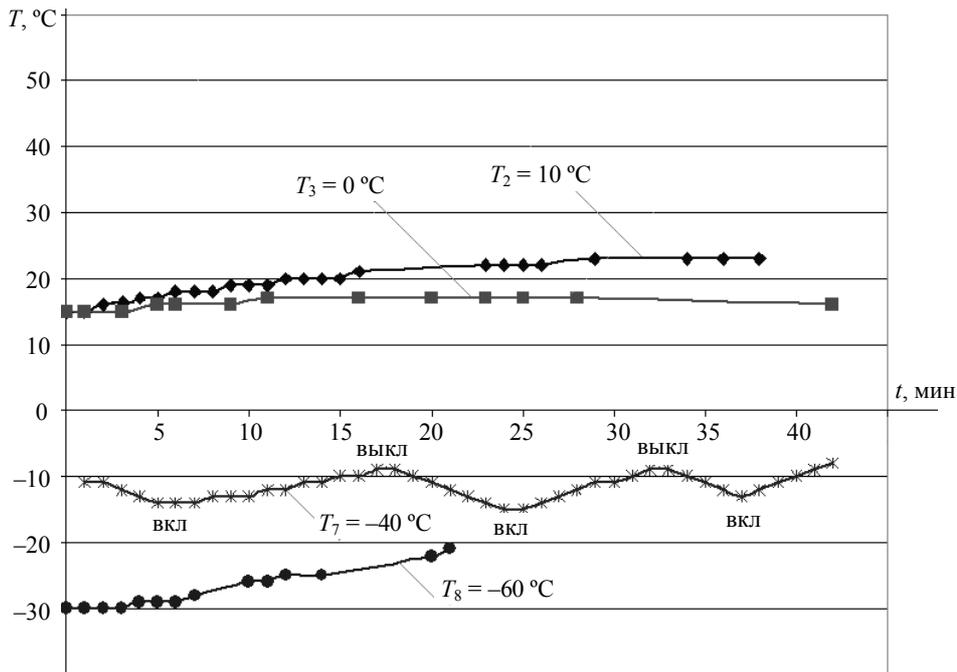


Рис. 10. Температурная зависимость датчика подогрева электронного блока $ESD - VCX$

При уменьшении температуры окружающей среды меньше чем $-13\text{ }^\circ\text{C}$ происходит включение нагревательного элемента, встроенного в блок управления. В этом случае к тепловому потоку, получаемому за счёт работы электронных компонентов внутри блока, добавляется тепловой поток от дополнительного нагревателя.

Включение нагревателя приводит к уменьшению времени нагрева.

В случае работы в зоне низких температур дополнительный нагревательный элемент включается, если внутри блока температура начинает превышать значение $-9\text{ }^\circ\text{C}$, и включается повторно, если температура опять падает ниже чем $-13\text{ }^\circ\text{C}$. Использование «мёртвой зоны» в алгоритме управления нагревательным элементом позволяет стабилизировать режимы работы системы подогрева и минимизировать число включений нагревателя. Кроме того, выбранный порог отключения нагревательного элемента на уровне в $-9\text{ }^\circ\text{C}$ позволяет гарантировано избежать конденсации влаги внутри блока. Таким образом, внутри блока управления при низких температурах внешней среды поддерживается относительно постоянная температура. Отсутствие значительного градиента температуры положительно влияет на состояние полупроводниковых структур блока. В этом случае механические и электрические параметры полупроводниковых приборов изменяются незначительно [11]. В результате работоспособность блока повышается, что в свою очередь повышает работоспособность электропривода в целом.

ВЫВОДЫ

Для обеспечения нормальной работы электропривода с электронным блоком $ESD - VCX$ в широком диапазоне температур требуется обеспечить стабилизацию температурного режима электронных компонентов, входящих в его состав.

Анализ представленных расчетных и экспериментальных данных показал, что на характер изменения момента на выходном валу редуктора при моделировании температуры и частоты оказывают влияние два противоположных процесса различной физической природы, в частности, при понижении температуры повышается текущий критический и пусковой моменты за счет уменьшения активных сопротивлений статора и ротора асинхронного двигателя. Одновременно повышаются механические потери за счет изменения коэффициентов трения в подшипниках и редукторе, что приводит к снижению момента.

Как следует из исследований, при использовании традиционных смазок при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, значение момента нагрузки в редукторе асинхронного электропривода превышает максимально допустимое значение момента на выходном валу асинхронного электродвигателя на 27 %, что является недопустимым. При использовании смазки типа ВНИИНП-286М ТУ38-101950 в диапазоне температур от $+20$ до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ максимальный нагрузочный момент, прикладываемый к выходному звену асинхронного электропривода, не будет превышать 7 %, что в свою очередь допустимо согласно требований к запорной трубопроводной арматуре.

Анализ представленных экспериментальных данных показал, что на характер изменения момента на выходном валу редуктора при моделировании температуры и частоты оказывают влияние два противоположных процесса различной физической природы, в частности, при понижении температуры повышаются текущий, критический и пусковой моменты за счет уменьшения активных сопротивлений статора и ротора асинхронного двигателя. Одновременно с этим происходит непрерывное поддержание постоянным момента механических потерь за счет изменения коэффициентов регуляторов в системе управления электроприводом запорной трубопроводной арматурой, что приводит к стаби-

лизации момента во всем температурном диапазоне от $+20$ до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мустафин Ф.М. Трубопроводная арматура: учеб. пособие для вузов. Уфа: ГУП РБ УПК, УГНТУ, 2007. 326 с.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001. 274 с.
3. Каракулов А.С., Ланграф С.В. Разработка системы управления электроприводом запорной арматуры методом разделения математических моделей объектов управления // Изв. вузов. Электромеханика. № 3. 2006. С. 54 – 56.
4. Смирнов А.О. Повышение работоспособности асинхронного электропривода запорной арматуры при низких температурах: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, 2011.
5. Использование нанотехнологий. URL: http://valve-industry.ru/pdf_site/65/65-tech-obr-... (дата обращения 05.01.10).
6. Нанесение износостойкого покрытия на трубопроводную арматуру. URL: <http://plasmacentre.ru/works/18.php> (дата обращения 06.01.10).
7. Беляев А.Е. Механические передачи с промежуточными телами повышенной долговечности и точности. Томск: ГПИ, 2006.
8. Букреев В.Г., Хохряков Б.Г., Смирнов А.О. Повышение работоспособности асинхронного электропривода с волновым редуктором при низких температурах окружающей среды // Изв. вузов. Электромеханика. 2013. № 4. С. 27 – 31.
9. Назначение и применение конструкционной легированной стали. URL: <http://yaruse.ru/posts/show/id/617>, (дата обращения 06.01.10).
10. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
11. Langraf S.V., Obraztsov K.V. Optimization of vector control system induction motor drives. Modern techniques and technologies. MTT-2006. Proceedings of the 12-th International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, 27-31 March, Tomsk, 2006. TPU. Pp. 68 – 70.
12. Передачи с промежуточными телами качения. URL: <http://lustenkov.narod.ru> (дата обращения 15.03.10).

Смирнов Александр Олегович – доцент кафедры «Электропривод и электрооборудование» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета. E-mail: smirao2005@rambler.ru

Букреев Виктор Григорьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электропривод и электрооборудование» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета. Тел. (3822)56-46-28. E-mail: bukreev@tpu.ru

Зубреков Александр Эдуардович – магистрант кафедры «Электропривод и электрооборудование» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета. E-mail: anejibcuh@sibmail.com

ENSURED SUSTAINABLE WORK OF FREQUENCY-CONTROLLED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE AT LOW AMBIENT TEMPERATURES

A.O. Smirnov, Energy Institute of the National Research Polytechnic University. Russian Federation, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30.

V.G. Bukreev, Energy Institute of the National Research Polytechnic University. Russian Federation, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30.

A.E. Zubrekov, Energy Institute of the National Research Polytechnic University. Russian Federation, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30.

The effect of negative ambient temperature on the parameters of the asynchronous electric drive with a wave gear. Presents: A comparative analysis of the various manufacturers of asynchronous frequency-regulating electric drives on the basic parameters that vary significantly when the temperature drop from +20 to -60 °C; comparative results of theoretical and experimental studies of basic parameters (speed, current, torque) asynchronous electric valves, operating at low ambient temperatures. Researched and offered the best option is highly grease that reduces torque losses in the mechanical actuator (gear). The recommendations for improving the dynamic characteristics of the motor at low ambient temperatures.

Key words: asynchronous electric drive, wave reducer, low temperatures, alarm adaptation, induction motor parameters.

REFERENCES

1. Mustafin F.M. *Truboprovodnaya armatura* [Pipeline fittings]. Ufa, GUP RB UPK, UGNTU, 2007, 326 p.
2. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola, 2001, 274 p.
3. Karakulov A.S., Langraf S.V. Razrabotka sistemy upravleniya elektroprivodom zapornoj armatury metodom razdeleniya matematicheskikh modelei ob'ektov upravleniya [Development of the system of control of the electric drive of shutoff valves by method of division of mathematical models of objects of management]. *Izv. vuzov. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2006, no. 3, pp. 54 – 56. [In Russ.]
4. Smirnov A.O. *Povyshenie rabotosposobnosti asinkhronnogo elektroprivoda zapornoj armatury pri nizkikh temperaturakh. Diss. kand. tekhn. nauk* [Increase of operability of the asynchronous electric drive of shutoff valves at low temperatures. Cand. techn. sci. diss.]. Tomsk, 2011.
5. *Ispol'zovanie nanotekhnologii* [Use of nanotechnologies]. Available at: [http:// valve-industry.ru > pdf_site/65/65-tech-obr...](http://valve-industry.ru/pdf_site/65/65-tech-obr...) (accessed 05.01.10).
6. *Nanesenie iznosostoikogo pokrytiya na truboprovodnyuyu armaturu* [Drawing a wearproof covering on pipeline fittings]. Available at: [http:// plasmacentre.ru > works/18.php](http://plasmacentre.ru/works/18.php). (accessed 06.01.10).
7. Belyaev A.E. *Mekhanicheskie peredachi s promezhutochnymi telami povyshennoi dolgovechnosti i tochnosti* [Mechanical transfers with intermediate bodies of the increased durability and accuracy]. Tomsk, TPI, 2006.
8. Bukreev V.G., Khokhryakov B.G., Smirnov A.O. *Povyshenie rabotosposobnosti asinkhronnogo elektroprivoda s volnovym reduktorom pri nizkikh temperaturakh okruzhayushchei sredy* [Increase of operability of the asynchronous electric drive with a wave reducer in case of low ambient temperatures]. *Izv. vuzov. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2013, no. 4, pp. 27 – 31. [In Russ.]
9. *Naznachenie i primenenie konstruktsionnoi legirovannoi stali* [Appointment and use of the constructional alloyed steel]. Available at: [http:// yaruse.ru > posts/show/id/617](http://yaruse.ru/posts/show/id/617). (accessed 06.01.10).
10. Shreiner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical simulation of electric drives of an alternating current with semiconductor frequency converters]. Yekaterinburg, URO RAN, 2000, 654 p.
11. Langraf S.V., Obraztsov K.V. Optimization of vector control system induction motor drives. Modern techniques and technologies. MTT-2006. Proceedings of the 12-th International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, 27-31 March, 2006 Tomsk, Russia. TPU. Pp. 68 – 70.
12. *Peredachi s promezhutochnymi telami kacheniya* [Transfers with intermediate bodies of swing]. Available at: [http:// lus-tenkov.narod.ru](http://lus-tenkov.narod.ru). (accessed 15.03.10).

Information about the authors:

Alexandr O. Smirnov, Associate Professor. E-mail: smirao2005@rambler.ru

Viktor G. Bukreev, Doctor of Technical Sciences Professor. Ph. (3822)56-46-28. E-mail: bukreev@tpu.ru

Alexandr E. Zubrekov, Undergraduate student. E-mail: anejibcuh@sibmail.com

Received 22 January 2016