

УДК 621.3:62–52–83

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ

Паук Любовь Анатольевна¹,
pla@tpu.ru

Воронина Наталья Алексеевна¹,
voronina@tpu.ru

Логвиненко Анатолий Анатольевич²,
logvinenkotolya@rambler.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² ООО «Энергонефть Томск»,
Россия, 636785, г. Стрежевой, ул. Строителей, 95.

Актуальность работы обусловлена необходимостью модернизации различного оборудования на многих старых газокompрессорных станциях в связи с постройкой газопровода «Сила Сибири».

Цель работы: провести анализ пуска электропривода компрессорной установки перекачки природного газа после замены синхронного двигателя на асинхронный. Данная установка является частью большой системы газоснабжения Сибири и Дальнего Востока,

Методы: анализ и синтез замкнутых электромеханических систем, математическое описание электропривода переменного тока компрессора в осях x , y , 0 с законом управления U/f и учётом особенностей работы на «дожим» природного газа в системе его перекачки. Кроме того, были учтены изменения внутренних параметров исполнительного двигателя (фирмы Siemens типа 1TA2832–4AU01-Z) при увеличении частоты питающего напряжения в пределах от 70 до 150 Гц, а именно уменьшение активных и индуктивных сопротивлений обмоток статора и ротора на 8–12 %, и проведена оценка влияния частоты на динамические показатели электропривода компрессора.

Результаты. Получили полную автоматизацию подачи и перекачки природного газа, установили, что изменение частоты питающего напряжения в два раза приводит к увеличению пускового момента на 13 %. Установили, что частота питающего напряжения, равная 136 Гц, является наиболее оптимальной, т. к. позволяет снизить рабочие токи в цепях обмоток статора исполнительного двигателя и устранить проблему бросков токов при пуске, что, в свою очередь, позволило уменьшить потребление электроэнергии в компрессорном цехе на 15–18 %.

Ключевые слова:

Газокompрессорная станция, электропривод компрессора, «дожим» газа, рабочее давление, время переходного процесса, модернизация.

Введение

Улучшением энергосбережения компрессорных станций магистральных газопроводов занимают как отечественные [1, 2], так и иностранные ученые [3–6]. Исходя их обзора литературных источников можно выделить два основных направления: эффективная экологически безопасная передача природного газа до конечного потребителя и разработка новых методов повышения эффективности работы компрессорных станций и их агрегатов [7].

Наиболее простым путем модернизации является уменьшение энергопотребления компрессорных центробежных машин, которые составляют до 40 % мощностей всей станции. Поэтому увеличение их коэффициента полезного действия (КПД) позволит уменьшить затраты на сжатие и перекачку газа. И здесь есть несколько путей решения данного вопроса: модернизация механических узлов и внедрение современных средств автоматизации с заменой или установкой дополнительного оборудования вплоть до применения нейронного программирования и систем прогнозирования сложных нелинейных систем [8, 9]. В первом случае устраня-

ются потери энергии компрессора в рабочих деталях (клапаны, патрубки и т. д.) [10–17], а во втором – реализация группового управления, глубокого дросселирования, обеспечение расширения рабочей точки [18]. Поэтому считаем, что комбинация двух подходов даст наибольший результат, т. к. будет учитывать сильные и слабые стороны обоих методов.

Отметим, что реконструкция газопровода имеет важное значение для обеспечения надёжности газоснабжения потребителей Сибирского федерального округа и Дальнего Востока. В связи с постройкой газопровода «Сила Сибири» наметилась тенденция развития и модернизации данной отрасли. Использование современных технологий и конструкторских решений позволяет повысить производительность работы станций, существенно сэкономить электроэнергию, а также повысить КПД газоперекачивающих агрегатов [2]. Поэтому в рамках реконструкции стационарной ГЭС «Александровская» произвели замену старых синхронных электродвигателей на новые асинхронные, при этом используя преобразователи частоты для точного регулирования давления газа.

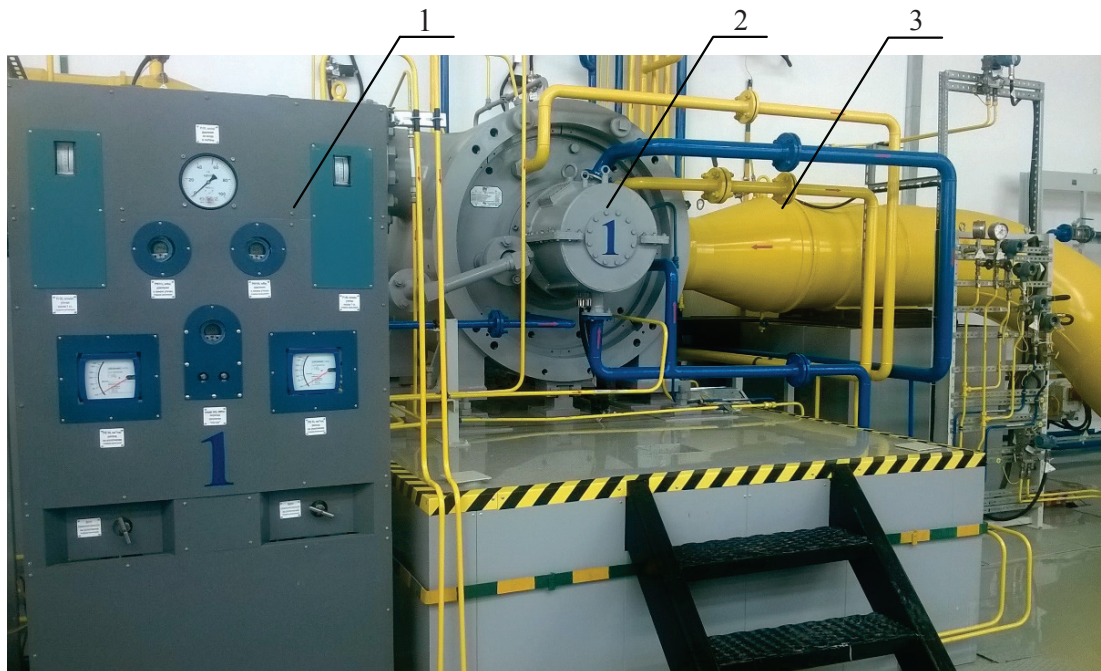


Рис. 1. Компрессорная установка: 1 – шкаф управления; 2 – компрессор; 3 – газовая труба

Fig. 1. Compressor system: 1 is the control cabinet; 2 is the compressor; 3 is the gas pipe

На данной ГКС используются центробежные нагнетатели (рис. 1), которые приводятся в движение при помощи электрического привода. Суммарная мощность электроприводов шести газоперекачивающих агрегатов (ГПА) составляет 24 МВт, по 4 МВт каждый. ГКС «Александровская» – головная станция, является первой после газоперерабатывающего завода в г. Нижневартовске.

Центробежные нагнетатели (рис. 1) компрессорной станции работают параллельно с сетью. Из магистрального газопровода транспортируемый газ поступает в вертикальные масляные пылеуловители. После пылеуловителей на пути транспортируемого газа установлены маслоуловитель и маслосорбник. Особенностью электропривода нагнетателя является его работа в сложных взрывоопасных условиях [19].

Достоинства и недостатки синхронных двигателей известны [20], поэтому остановимся на конкретных неполадках и особенностях, которые возникли при эксплуатации именно СТД 4000 кВт. Исследования показали, что:

- 1) прямой пуск СТД-4000–2 был настолько сложным, что щетки на токосъемных кольцах начинали искрить из-за того, что охладителем являлось масло, которое вследствие износа агрегата протекало;
- 2) отсутствует автоматизация процессов перекачки природного газа;
- 3) проблемы в системе автоматического воздушного охлаждения (АВО) носили систематический характер: в зимний период при пуске агрегата масло нагревалось до необходимой температуры электрическими тепло-нагревательными элементами (ТНЭ) мощностью 200 кВт, а

это энергозатратно и долговременно; летом же, система АВО оснащалась дополнительным водяным охлаждением;

- 4) подшипники агрегатов очень часто находились в ремонте, т. к. электрические и нагнетательные машины были массивны, а частота вращения вала центробежного нагнетателя составляла 8000 об/мин, что приводило к частым поломкам элементов ГПА, которые уже технически устарели.

В связи с невозможностью точного регулирования давления газа при помощи запорно-регулирующей арматуры, а также других недостатков при эксплуатации СД требуется заменить их на более современные. Заменой СТД-4000–2 может служить асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором [20, 21].

Устаревший СТД-4000–2 с мультипликатором обеспечивал синхронную частоту вращения 8000 об/мин. Высоковольтный электродвигатель АРМ-4000/10–2УХЛ4 имеет достаточно хорошие характеристики, но его синхронная частота вращения составляет 3000 об/мин, следовательно, так же, как и для СТД-4000–2, будет необходим мультипликатор для повышения частоты вращения [20].

В качестве альтернативы российскому АД рассмотрим исполнительный двигатель фирмы Siemens типа 1TA2832–4AU01-Z (рис. 2) [22]. Конструктивной особенностью данного двигателя является использование короткозамкнутой обмотки, уложенной в пазы массивного ротора. Ротор изготовлен из никелевой стали, обмотка закреплена в пазах термомодиффузионной сваркой. Гладкая наружная поверхность ротора позволяет снизить вентиляционные потери двигателя.



Рис. 2. Асинхронный двигатель Siemens 1TA2832-4AU01-Z в сборе с системой воздушного охлаждения

Fig. 2. Induction Motor Siemens 1TA2832-4AU01-Z assembly with air cooling system

К достоинствам системы ПЧ-АД с КЗ типа 1TA2832-4AU01-Z можно отнести: простоту в обслуживании, эксплуатации и конструкции; высокую надежность; безмасленное охлаждение посредством вентиляторов; плавную регулировку частоты вращения вала электродвигателя; плавную и точную регулировку давления газа; отсутствие подшипников – использование магнитных подвесов, следовательно, высокий КПД для массивного и высокомоощного двигателя; отсутствие редуктора. А к недостаткам относятся: малый пусковой момент и большой пусковой ток; высокая чувствительность к изменениям параметров в сети [22, 23].

Аварийные ситуации, часто возникающие в нерегулируемом электроприводе, можно избежать, применяя частотное регулирование скорости компрессора. Поэтому применение частотно-регулируемых электроприводов является актуальным для газоконпрессорных механизмов [22].

О методике структурного моделирования электропривода компрессора

В компрессорном цехе данной ГКС заменили шесть старых агрегатов СТД 4000 кВт на три агрегата АД с ПЧ 4000 кВт (рис. 2), один из которых находится в резерве. Паспортные данные АД: $P_n=4000$ кВт; $\text{КПД}=0,95$; $\cos=0,74$; $n=8200$ об/мин [18]. Мощность агрегатов осталась прежней, но их количество сократилось в два раза и это связано с тем, что давление газа в газопроводе не превышает нормы, а значит, не требуется большого количества газоперекачивающих агрегатов.

На рис. 3 приведем функциональную схему электропривода компрессора с частотным управлением.

Считается, что при частотном управлении в замкнутом электроприводе учитывается влияние изменения частоты и напряжения на асинхронный двигатель. Применяя методику [24], выявили, что влияние частоты питающего напряжения есть, а именно, индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора уменьшаются. Индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора АД рассчитываются с учетом [24] по следующим соотношениям:

$$L_{\sigma S} = \frac{1}{\omega^2} A_1 \frac{1}{D^2 l_s} \sum \lambda_1;$$

$$L_{\sigma R} = \frac{1}{\omega^2} A_1' \frac{1}{(D - 2\delta)^2 l_s} \sum \lambda_2, \quad (1)$$

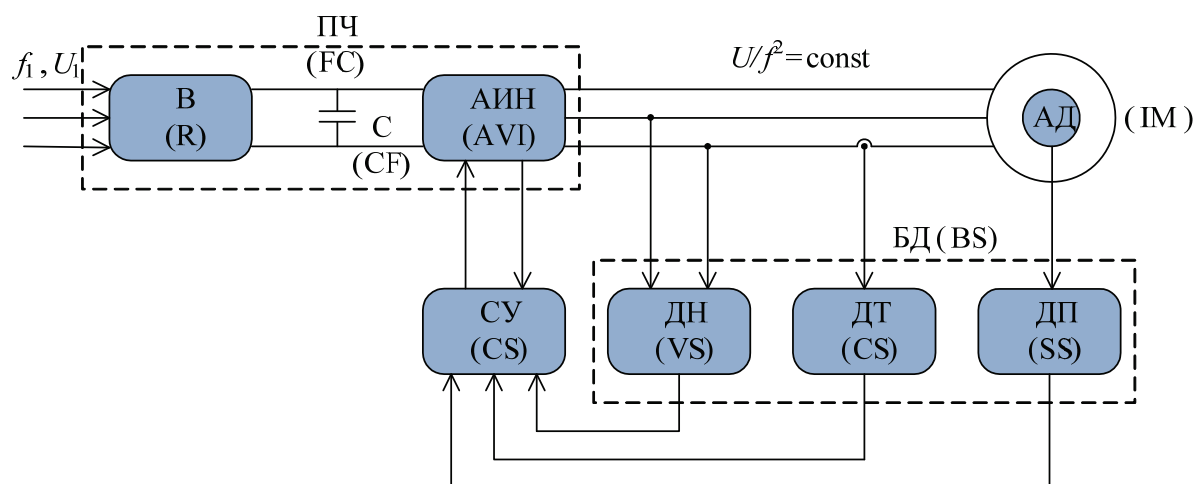


Рис. 3. Функциональная схема электропривода: В – выпрямитель; С – фильтр; АИН – автономный инвертор напряжения; ПЧ – преобразователь частоты; СУ – система управления выпрямителем и инвертором; АД – асинхронный двигатель; БД – блок датчиков; ДН – датчик напряжения; ДП – датчик потока; ДТ – датчик тока

Fig. 3. Function circuit electric drive: R is the rectifier; CF is the capacitor filter; AVI is the autonomous voltage inverter; FC is the frequency converter; CS is the control system; IM is the induction motor; BS is the block of sensors; VS is the voltage sensor; SS is the stream sensor; CS is the current sensor

где ω – угловая частота вращения поля статора; l_s – длина магнитопровода; δ – величина воздушного зазора; D – внутренний диаметр рачотки статора; $q_{\text{эф1}}, q_{\text{эф2}}$ – сечения эффективных проводников обмоток статора и ротора; A_1, A'_1 – коэффициенты, которые зависят от величин, при учёте рекомендаций [24].

Выражения (1) были использованы при формировании М-файла, который задаёт исходные данные для модели электропривода компрессора. На рис. 4 приведены зависимости внутренних параметров асинхронного двигателя от частоты питающего напряжения.

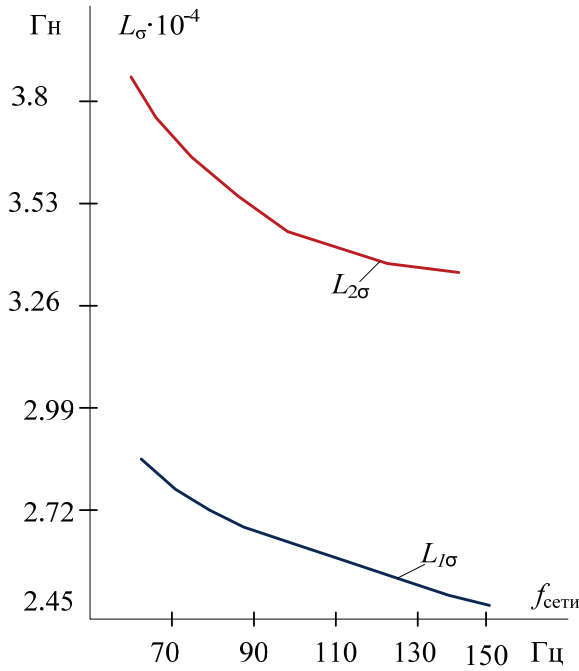


Рис. 4. Зависимости активного сопротивления обмотки статора и индуктивностей исполнительного двигателя от частоты питающей сети

Fig. 4. Dependences of active resistance of the stator winding and the inductances of the executive motor on supply network frequency

По результатам анализа выражений (1) была разработана модель электропривода компрессора, которая учитывает влияние частоты питающей сети на внутренние параметры асинхронного двигателя, согласно методике [25, 26].

Для математического описания используем обобщенную систему уравнений для асинхронного двигателя, которая имеет вид, согласно [26] (следует предположить, что $U_R=0$):

$$\begin{aligned} \bar{U}_s &= r_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j\alpha_k \bar{\psi}_s; \\ 0 &= r_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\alpha_k - p\mathcal{G}_m) \bar{\psi}_r; \\ \bar{\psi}_s &= L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_r &= L_r \bar{i}_r + L_m \bar{i}_s; \\ m &= k \text{Mod}(\bar{\psi}_i \bar{i}_k); \\ \bar{T}_m \frac{d\bar{\mathcal{G}}_m}{dt} &= m - m_n, \end{aligned} \quad (2)$$

где \bar{U}_s – проекции векторов напряжений статора и ротора на соответствующие оси координат; \bar{i}_s, \bar{i}_r – проекции векторов токов статора и ротора на соответствующие оси координат; $\bar{\psi}_s, \bar{\psi}_r$ – проекции векторов потокосцеплений статора и ротора на соответствующие оси координат; r_s, r_r – активные сопротивления статорной и роторной обмоток; α_k – относительная частота вращения системы координат; v_m – относительная частота вращения ротора; p – число пар полюсов; L_s, L_r – полные индуктивности обмоток статора и ротора, соответственно; L_m – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; \bar{v}_m – вектор скорости вращения поля ротора; m – электромагнитный момент исполнительного двигателя; m_n – механический момент двигателя; \bar{T}_m – механическая постоянная двигателя.

Методика преобразований уравнений общеизвестна и представлена в литературе [26, 27]. После преобразований уравнений равновесия (2) для имитационной модели АД в системе координат $x, y, 0$ примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{i}_{sx} &= \left(u_{sx} + x'_s \alpha_k i_{sy} + \frac{k_r}{T_r} \psi_{rx} + p v_m k_r \psi_{ry} \right) \frac{1/r}{1+T'_s s}; \\ \bar{i}_{sy} &= \left(u_{sy} + x'_s \alpha_k i_{sx} + \frac{k_r}{T_r} \psi_{ry} + p v_m k_r \psi_{rx} \right) \frac{1/r}{1+T'_s s}; \\ \bar{\psi}_{rx} &= (k_r r_r i_{sx} + (\alpha_k - p v_m) \psi_{ry}) \frac{T_r}{(1+T_r s)}; \\ \bar{\psi}_{ry} &= (k_r r_r i_{sy} - (\alpha_k - p v_m) \psi_{rx}) \frac{T_r}{(1+T_r s)}; \\ m &= k_r (\psi_{rx} i_{sy} - \psi_{ry} i_{sx}); \\ v_m &= \frac{1}{s} \left(\frac{1}{T_m} \right) (m - m_n); \\ \gamma &= \frac{1}{s} (\alpha_k), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\bar{i}_{s1}, \bar{i}_{r1}$ – проекции векторов токов статора и ротора на соответствующие оси координат; $\bar{\psi}_{s1}, \bar{\psi}_{r1}$ – проекции векторов потокосцеплений статора и ротора на соответствующие оси координат; x'_s – полное индуктивное сопротивление обмотки статора, приведенное к обмоткам ротора; k_r – коэффициент связи, обмотки статора с обмотками ротора; p – число пар полюсов; T_r, T'_s – постоянные времени электромагнитных переходных процессов в цепях статора и ротора, соответственно; s – оператор Лапласа; γ – относительное ускорение системы координат.

В качестве основных базовых величин выбираются амплитудные номинальные значения фазного напряжения и тока, а также номинальное значение

ние угловой частоты, согласно методике [26]. Базовые параметры двигателя сведены в табл. 1.

Таблица 1. Базовые параметры асинхронного двигателя типа 1TA2832-4AU01-Z

Table 1. Basic parameters of 1TA2832-4AU01-Z Induction Motor

Параметр Parameter	U_b , В	I_b , А	M_b , Н·м	m_n , о.е.	ω_b , 1/с	t_b , с
Величина Dimension	2694,1	1408	13255,5	0,75	858,5	0,012

Коэффициенты модели уравнений (3) рассчитываем по известным выражениям, согласно методике [25], их численные значения приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры асинхронного двигателя типа 1TA2832-4AU01-Z фирмы Siemens в относительных единицах

Table 2. Parameters of 1TA2832-4AU01-Z Siemens Induction Motor in relative units

Параметр Parameter	r_R	r	k_r	x_s'	\bar{T}_R	T_S'	\bar{T}_m	M_n , Н·м
Величина Dimension	0,02	0,038	0,95	0,311	190	8,18	1167,6	4736

На рис. 5 приведена структурная схема замкнутого электропривода компрессора.

Сигнал задания по скорости воздействует на электропривод через задатчик интенсивности (ЗИ). Система регулирования относится к классу систем с полужамкнутым управлением. В быстрых процессах действует сигнал управления заданной частоты, что соответствует разомкнутому управлению. В медленных процессах действует обратная связь по измеренной угловой скорости асинхронного двигателя, что соответствует замкнутому управлению.

Нелинейная зависимость момента нагрузки от скорости двигателя рассчитывается по выражению:

$$M_c(\omega) = 0,05M_n + 0,95M_n \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 = 236,817 + 0,0063\omega^2. \quad (4)$$

Подсистема «Function» реализует математическую функцию при законе регулирования

$U/f^2 = \text{const}$ [26] и так же используется при формировании нелинейного момента нагрузки (4):

$$U(f) = U_{1ф} \frac{f^2}{f_n^2} = 0,102f^2.$$

Исследование переходных процессов давления газа при пуске ГПА проводим на основании методики из литературы [26].

Для того чтобы определить давление на выходе ЭГПА, необходимо смоделировать нагнетатель. Воспользуемся формулой [28], которая позволяет определить давление газа на выходе нагнетателя в зависимости от его скорости:

$$P_{\text{вых}} = \left[1 + \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 \frac{ZRT_{\text{вых}}}{ZRT_{\text{вх}}} (\varepsilon_0^\alpha - 1) \right] P_{\text{вх}}, \quad (5)$$

где n – частота вращения нагнетателя ГПА, об/мин; n_0 – номинальная частота вращения нагнетателя ГПА, об/мин; ε_0 – приведенная степень сжатия; R – газовая постоянная; $T_{\text{вых}}$ – температура газа на выходе из нагнетателя, °С; $T_{\text{вх}}$ – температура газа на входе нагнетателя, °С; $P_{\text{вых}}$ – давление на выходе из нагнетателя, МПа; $P_{\text{вх}}$ – давление на входе нагнетателя, МПа; α – политропный коэффициент полезного действия.

Учитывая изменение температуры газа при компримировании, выражение в формуле (5)

$\frac{ZRT_{\text{вых}}}{ZRT_{\text{вх}}}$ примем равным 1,2.

Получим:

$$P_{\text{вых}} = \left[1 + \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 1,2(\varepsilon_0^\alpha - 1) \right] P_{\text{вх}}. \quad (6)$$

Далее принимаем: $P_{\text{вх}} = 3,5$ МПа; $\varepsilon_0 = 1,26$ о.е.; $n_0 = 8500$ об/мин; $\alpha = 0,85$.

Подставив данные в уравнение (6), находим давление на выходе при номинальной скорости двигателя:

$$P_{\text{вых}} = \left[1 + \left(\frac{8080}{8500} \right)^2 1,2 \cdot (1,26^{0,85} - 1) \right] \cdot 3,5 \cdot 10^6 = 4,367 \text{ МПа}.$$

Имитационная модель системы в среде Matlab Simulink представлена на рис. 6.

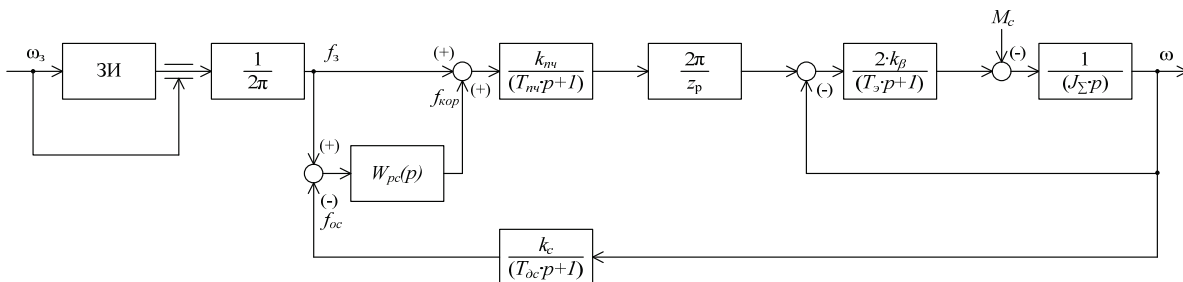


Рис. 5. Структурная схема электропривода компрессора с отрицательной обратной связью по скорости

Fig. 5. Block diagram of electric drive of the compressor with negative speed feedback

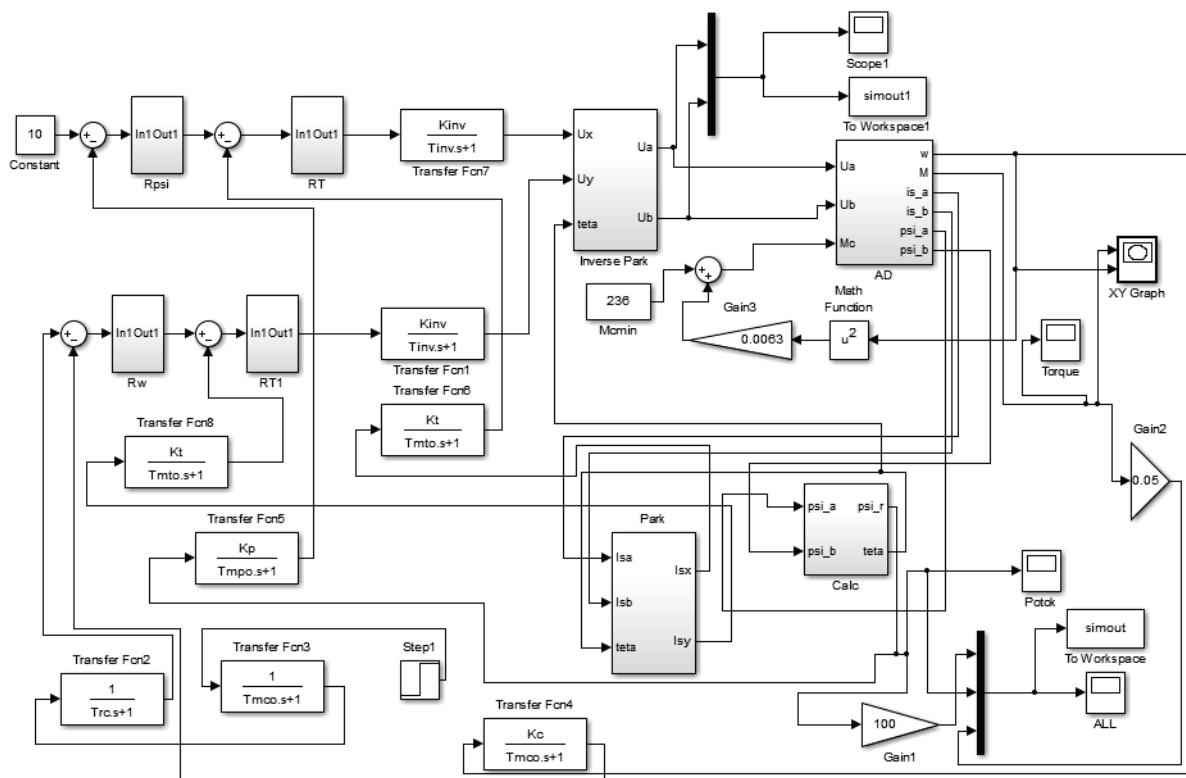


Рис. 6. Имитационная модель нагнетателя и асинхронного электропривода со скалярным управлением

Fig. 6. Simulation model of supercharger and asynchronous electric drive with scalar control

Результаты

В качестве результатов моделирования получили: динамическую электромеханическую характеристику при пуске электропривода компрессора на заданную частоту, а также изменение давления в системе подачи природного газа с имитацией процесса «дожима».

Процесс «дожима» осуществляется под частичной активной нагрузкой, т. е. в первую очередь открываются задвижки на газовом узле, и газ подается на ГПА, чтобы стравить воздух между газовым узлом и самими ГПА. Это необходимо для того, чтобы не образовалась воздушная пробка и не изменился химический состав газа. Затем производится пуск электрических двигателей. Газ, в свою очередь, «приходит» на ГПА под давлением и частично «помогает» раскрутить вал нагнетателя, а соответственно, сделать пуск АД более простым. Из рис. 7 видно, что пуск АД происходит в рабочем режиме.

Пуск двигателя осуществляется в пределах 900 секунд, т. к. данный тип АД имеет достаточно большие габариты и мощность. Вследствие этого АД не может выйти на номинальную частоту вращения за короткое время, в отличие от двигателей общепромышленного назначения.

Чтобы пуск исполнительного двигателя компрессорной установки был адекватен, используется задатчик интенсивности для имитации пуска АД в режиме «дожима». Ниже приведены графи-

ки переходных процессов угловой скорости вращения двигателя $\omega=f(t)$ и давления газа на выходе нагнетателя $P=f(t)$ от функции времени (рис. 8, 9).

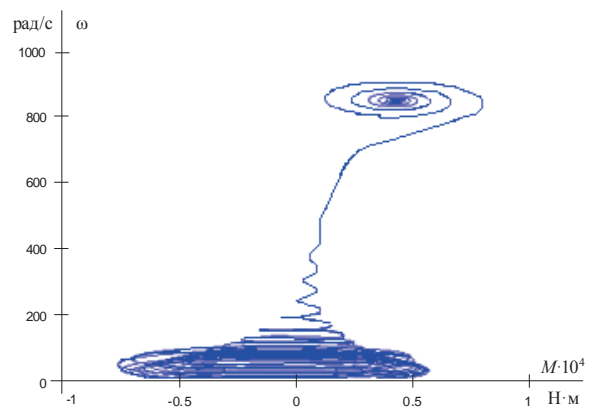


Рис. 7. Динамическая электромеханическая характеристика при прямом пуске электропривода с частотой $f=136,7$ Гц

Fig. 7. Dynamic electromechanical characteristic at start of the electric drive at frequency of 136,7 Hz

Результаты исследования переходных процессов давления газа при пуске электропривода на максимальную частоту полностью соответствуют паспортным данным газоперекачивающих агрегатов ($P_{вх}=3,5$ МПа; $P_{вх}=4,41$ МПа).

Кроме того, было проведено исследование влияния частоты питающей сети на ударные значения пускового электромагнитного момента (рис. 10).

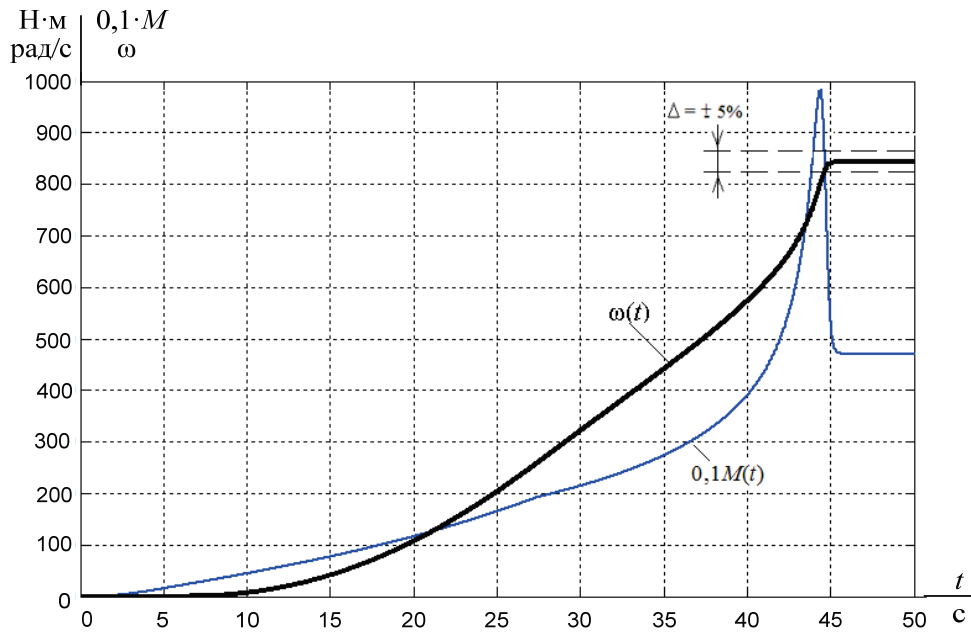


Рис. 8. Переходные процессы скорости и момента двигателя при пуске электропривода с задатчиком интенсивности на максимальную частоту

Fig. 8. Transient processes of speed and electromagnetic moment of the engine at start-up of the electric drive with the intensity selector to the maximum frequency

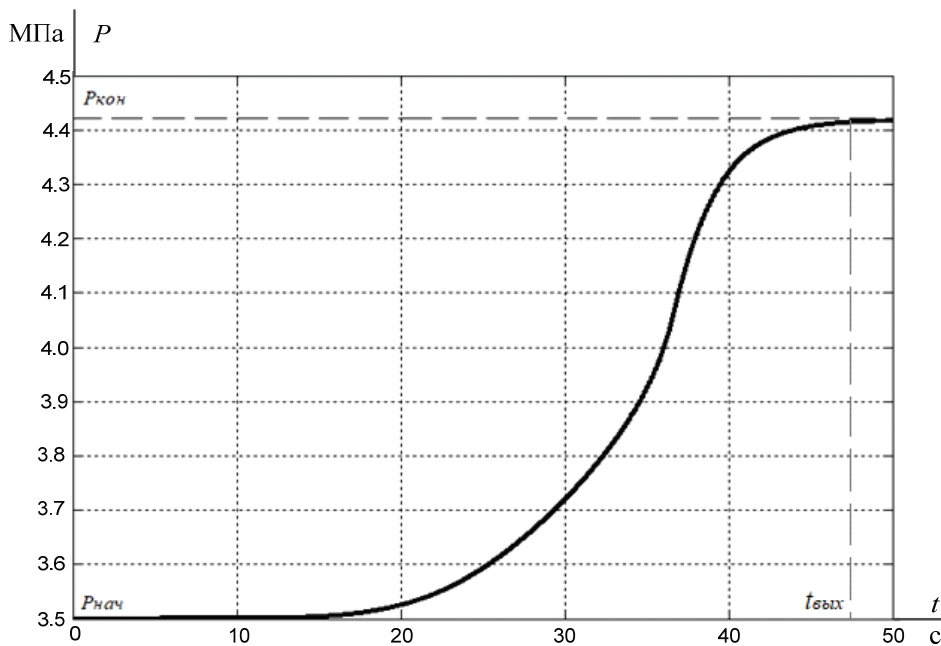


Рис. 9. Переходные процессы давления при пуске электропривода на максимальную частоту

Fig. 9. Transient processes of pressure at start-up of the electric drive with the intensity selector to the maximum frequency

Исследования показали, что увеличение частоты питающей сети в два раза способствует уменьшению значения ударного электромагнитного момента на 15–17 %. Следовательно, учитывая данное обстоятельство, можно улучшить динамические показатели замкнутого регулируемого электропривода компрессора.

Таким образом, применение регулируемого электропривода газоперекачивающих агрегатов на основе АД с КЗ типа 1TA2832–4AU01-Z фирмы Siemens позволяет создать новую технологию энергосбережения. Также современные технологии позволяют производить пуск ГПА и регулировку давления природного газа в газопроводе как на месте, так и дистанционно [22].

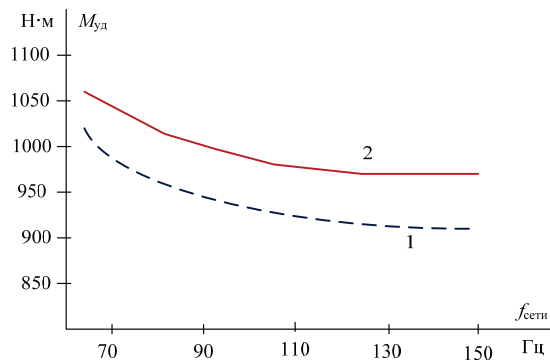


Рис. 10. Анализ влияния частоты питания на динамические показатели электропривода

Fig. 10. Analysis of power frequency influence on dynamic performance of the electric drive

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ энергосбережения энергоресурсов магистральных газопроводов на компрессорных станциях: пат. Рос. Федерация № 2171420, заявл. 30.12.99; опубл. 27.07.01, Бюл. № 21. – 5 с.
2. Неволин А.М., Плотников П.Н. Повышение эффективности работы аппаратов воздушного охлаждения масла газоперекачивающих агрегатов на базе газотурбинной установки ГТН-16 // Вестник Ужно-Уральского Университета. Серия: Энергетика. – 2014. – № 4. – С. 11–17.
3. Ríos-Mercado R.Z., Borraz-Sánchez C. Optimization Problems in Natural Gas Transportation Systems: a State-of-the-Art Review // Applied Energy. – 2015. – V. 147. – P. 536–555. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.03.017
4. A comparison of automation techniques for optimization of compressor scheduling / H.H. Nguyen, V. Uraikul, C.W. Chan, P. Tontiwachwuthikul // Advances in Engineering Software. – 2008. – V. 39. – № 3. – P. 178–188. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2007.02.003
5. Modernization of the Equipment of a Head Compressor Station / S. Jasson, P. Pätzold, A. Emde, R. Kurz // ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. – Düsseldorf: ASME Pbl., 2014. – V. 3. – P. 6–18. DOI: 10.1115/GT2014-25135.
6. Operation Optimization of Natural Gas Transmission Pipelines Based on Stochastic Optimization Algorithms: a Review / X. Wu, C. Li, Y. He, W. Jia // Mathematical Problems in Engineering. – 2018. DOI: 10.1155/2018/1267045
7. Кочкин П.А., Мухин И.Н. Методы повышения эффективности работы компрессорных станций // Информатизация и Системы Управления в промышленности. – 2009. – № 3 (23). – С. 15–22.
8. An NSGA-II based multiobjective optimization for combined gas and electricity network expansion planning / Y. Hu, Z. Bie, T. Ding, Y. Lin et al. // Applied Energy. – 2016. – V. 167. – P. 280–293. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.148.
9. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 123–131.
10. Kurz R., Brun K. Process control for compression systems // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2017. – V. 140. – № 2. DOI: 10.1115/1.4037723
11. Restrepo B., Tucker D., Banta L.E. Recursive System Identification and Simulation of Model Predictive Control Based on Experimental Data to Control the Cathode Side Parameters of the Hy-

Заключение

Замена старых синхронных двигателей типа СТД-4000–2 на систему ПЧ-АД с КЗ типа 1TA2832–4AU01-Z производства фирмы Siemens привела к тому, что процесс «дожима» газа стал более безопасным, автоматизированным и эффективным.

Учет влияния частоты питающего напряжения на внутренние параметры исполнительного двигателя, а именно уменьшение их на 12 %, приводит к уменьшению пускового момента на 15 %.

Все шаги по модернизации компрессорного оборудования (ГКС в целом) привели к его лучшей работоспособности и безотказности, что для резервного объекта большой газотранспортной системы является основополагающим.

- brid Fuel Cell/Gas Turbine // J. Electrochem. En. Conv. Stor. – 2017. – V. 14. – № 3. – P. 1145–1161. DOI: 10.1115/1.4036944
12. Validation of nominations in gas network optimization: Models, methods, and solutions. Optimization Methods and Software / M. Pfetsch, A. Fügenschuh, B. Geißler, N. Geißler, R. Golmer, B. Hiller, J. Humpola, T. Koch, T. Lehmann, A. Martin, A. Morsi, J. Rövekamp, L. Schewe, M. Schmidt, R. Schultz, R. Schwarz, J. Schweiger, C. Stangl, M. Steinbach, S. Vigerske, B. Willert. – Abingdon: Taylor & Francis Publ., 2015. – 361 p.
13. Efficient Dynamic Compressor Optimization in Natural Gas Transmission Systems / T.W.K. Mak, P. Van Hentenryck, A. Zlotnik, H. Hijazi, R. Bent // American Control Conference. – Boston, 2016. – V. 32. – P. 7484–7491. DOI: 10.1109/ACC.2016.7526855
14. Nai-Yuan Chiang, Zavala V. Large-scale optimal control of interconnected natural gas and electrical transmission systems // Applied Energy. – April 2016. – P. 226–235. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.017
15. Модульная компрессорная станция: пат. Рос. Федерация № 2463515, заявл. 05.05.11; опубл. 10.10.12, Бюл. № 28. – 8 с.
16. Дожимная компрессорная станция газопровода: пат. Рос. Федерация № 2463515, заявл. 26.03.04; опубл. 27.06.06, Бюл. № 18. – 16 с.
17. Компрессорная установка: пат. Рос. Федерация № 2529431C1, заявл. 23.07.13; опубл. 27.09.14, Бюл. № 27. – 8 с.
18. Блочный компрессорный агрегат: пат. Рос. Федерация № 2511957, заявл. 21.11.12; опубл. 10.04.14, Бюл. № 10. – 10 с.
19. ГОСТ 12.0.003–74. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 5 с.
20. Машины электрические: справочник. Т. 3: Машины электрические большой мощности. Ч. 2: Электродвигатели синхронные, генераторы синхронные. – М.: Изд-во ВНИИСтандартэлектро, 1990. – 182 с.
21. Машины электрические справочник. Т. 3: Машины электрические большой мощности. Ч. 1: Электродвигатели асинхронные. – М.: Изд-во ВНИИСтандартэлектро, 1990. – 263 с.
22. Газовые турбины «Siemens» // Siemens. URL: <https://www.energy.siemens.com/ru/ru/mechanical-drives/gas-turbines/> (дата обращения: 10.02.2018)
23. Инструкция по эксплуатации ЭГПА-4,0/8200–56/1,26-Р, ОАО «Газпром», ООО «Газпром трансгаз Томск», Томское линейное управление магистральных газопроводов, 2011. – 73 с.
24. Aristov A.V., Aristova L.I., Ekkert I.A. The control system of electric vibrating motor under the potential phase modulation //

- Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS): Proc. of the International Conference. – Tomsk: IEEE, 2015. – 4 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414854
25. An Asynchronous Electric Drive with the Indirect Control of the Output Variables / A.V. Glazachev, Y.N. Dementiev, I.V. Rakov, A.D. Umurzakova // MATEC Web of Conferences. – 2017. – V. 91. – 6 p. DOI: 10.1051/mateconf/20179101039
26. Чернышев А.Ю., Дементьев Ю.Н., Чернышев И.А. Электропривод переменного тока. 2-е изд. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – 210 с.
27. Bezv D., Payuk L., Voronina N. The Controlled Electric Drive of the Automatic Cooling System of the Engine Room on a Vessel // MATEC Web of Conferences. – 2017. – V. 91. DOI: 10.1051/mateconf/20179101037
28. Соколова И.Ю., Теслева Е.П. Насосы, вентиляторы, компрессоры (Нагнетатели) // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 6. – Ч. 1. – С. 125–128; URL: <http://www.expeducation.ru/ru/article/view?id=10174> (дата обращения: 27.05.2018).

Поступила 16.10.2018 г.

Информация об авторах

Паук Л.А., кандидат технических наук, старший преподаватель отделения Электроэнергетики и электротехники, Инженерной школы Энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Воронина Н.А., кандидат технических наук, доцент отделения Электроэнергетики и электротехники, Инженерной школы Энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Логвиненко А.А., электромонтер по ремонту и обслуживанию электрооборудования ООО «Энергонефть Томск».

UDC 621.3:62–52–83

MODERNIZATION OF ELECTRIC DRIVE OF COMPRESSOR STATION

Lyubov A. Payuk¹,
pla@tpu.ruNataliya A. Voronina¹,
voronina@tpu.ruAnatoliy A. Logvinenko²,
logvinenkotolya@rambler.ru¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.² Company «Energoneft Tomsk»,
95, Stroiteley street, Strezhevoy, 636785, Russia.

The relevance of the work is caused by the need to modernize various equipment at many old gas compressor stations due to the construction of the «Siberia Power» gas pipeline.

The aim of the research is to analyze the operation of electric drive of a compressor unit for pumping natural gas, which is a part of a large gas supply system in Siberia and the Far East, after replacement of a synchronous motor by an asynchronous one.

Methods: analysis and synthesis of closed electromechanical systems, mathematical description of the AC drive of the compressor in axes $x, y, 0$ with the control law U/f^2 and taking into account the peculiarities of natural gas «booster» operation in the system of its pumping. In addition, the authors have considered the changes in internal parameters of the executive motor (Siemens company type 1TA2832–4AU01-Z) at increase in supply voltage frequency in the range from 70 to 150 Hz, namely a decrease in active and inductive resistances of stator and rotor windings by 8–12 %, and evaluated the frequency effect on the dynamic performance of the compressor electric drive.

Results. The authors have obtained complete automation of natural gas supply and pumping; it was found out that double change in supply voltage frequency results in increase of starting torque by 13 %. It was determined that supply voltage frequency, equal to 136 Hz, was the most optimal, as it allows reducing working currents in the chains of the stator of the executive motor and eliminating the problem of current spikes during start-up, which allowed reducing the consumption of electric energy in the compressor shop by 15–18 %.

Key words:

Gas compressor station, compressor electric drive, gas «booster», working pressure, transient time, modernization.

REFERENCES

- Shpileva V.A., Kamenskikh I.A. *Sposob Energoberezheniya energoresursov magistralnykh gazoprovodov na kompressornykh stantsiyakh* [Method of energy saving of energy resources of main gas pipelines at compressor stations]. Patent RF no. 2171420, 2001.
- Nevolin A.M., Plotnikov P.N. Increase of efficiency of operation of air cooling devices for oil of gas pumping units on the basis of GTN-16 gas turbine unit. *Bulletin of the South Ural State University Series «Power Engineering»*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 11–17. In Rus.
- Ri'os-Mercado R.Z., Borraz-Sranchez C. Optimization Problems in Natural Gas Transportation Systems: a State-of-the-Art Review. *Applied Energy*, 2015, vol. 147, pp. 536–555. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.03.017
- Nguyen H.H., Uraikul V., Chan C.W., Tontiwachwuthikul P. A comparison of automation techniques for optimization of compressor scheduling. *Advances in Engineering Software*, 2008, vol. 39, no. 3, pp. 178–188. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2007.02.003.
- Jasson S., Pätzold P., Emde A., Kurz R. Modernization of the Equipment of a Head Compressor Station. *ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*. Düsseldorf, ASME Publ., 2014. Vol. 3, pp. 6–18. DOI: 10.1115/GT2014–25135.
- Wu X., Li C., He Y., Jia W. Operation Optimization of Natural Gas Transmission Pipelines Based on Stochastic Optimization Algorithms: a Review. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, pp. 18. DOI: 10.1155/2018/1267045
- Kochkin P.A., Mukhin I.N. Metody povysheniya effektivnosti raboty kompressornykh stantsiy [Methods for improving the efficiency of compressor station operation]. *Informatizatsiya i Sistemy Upravleniya v promyshlennosti*, 2009, vol. 23, no. 3, pp. 15–22.
- Hu Y., Bie Z., Ding T., Lin Y. An NSGA-II based multiobjective optimization for combined gas and electricity network expansion planning. *Applied Energy*, 2016, vol. 167, pp. 280–293. DOI: /10.1016/j.apenergy.2015.10.148.
- Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Method for identifying parameters of submersible induction motors of electrical submersible pump units for oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 123–131.
- Kurz R., Brun K. Process control for compression systems. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2017, vol. 140, pp. 309–3016. DOI: 10.1115/1.4037723
- Restrepo B., Tucker D., Banta L.E. Recursive System Identification and Simulation of Model Predictive Control Based on Experimental Data to Control the Cathode Side Parameters of the Hybrid Fuel Cell/Gas Turbine. *J. Electrochem. En. Conv. Stor.*, 2017, vol. 14, no. 3, pp. 1145–1161. DOI: 10.1115/1.4036944
- Pfetsch M., Fëugenschuh A., Geiëslers B., Geiëslers N., Gollmer R., Hiller B., Humpola J., Koch T., Lehmann T., Martin A., Morsi A., Rëovekamp J., Schewe L., Schmidt M., Schultz R., Schwarz R., Schweiger J., Stangl C., Steinbach M., Vigerske S., Willert B. *Validation of nominations in gas network optimization: Models, methods, and solutions. Optimization Methods and Software*. Abingdon, Taylor & Francis Publ., 2015. 361 p.
- Mak T.W.K., Van Hentenryck P., Zlotnik A., Hijazi H., Bent R. Efficient dynamic compressor optimization in natural gas transmission systems. *American Control Conference*, 2016, vol. 32, pp. 7484–7491 DOI: 10.1109/ACC.2016.7526855

14. Chiang Nai-Y., Zavala V. Large-scale optimal control of interconnected natural gas and electrical transmission systems. *Applied Energy*, 2016, vol. 168, Iss. C, pp. 226–235. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.017
15. Savchenkov S.V., Repin D.G., Kolobov Yu.O., Shchepkin K.V., Misin S.Yu. *Modulnaya kompressornaya stantsiya* [Modular compressor station]. Patent RF no. 2463515, 2012.
16. Selivanov N.P. *Dozhimnaya kompressornaya stantsiya gazoprovoda* [Gas booster compressor station]. Patent RF no. 2463515, 2006.
17. Kurochkin A.V. *Kompressornaya ustanovka* [Compressor plant]. Patent RF no. 2529431C1, 2014.
18. Zalyalov M.F. *Blochny kompressorny agregat* [Block compressor unit]. Patent RF no. 2511957, 2014.
19. GOST 12.0.003–74. *Sistema standartov bezopasnosti truda. Opasnye i vrednye proizvodstvennye faktory. Klassifikatsiya* [State Standard 12.0.003–74 Occupational safety standards system. Dangerous and harmful production effects. Classification]. Moscow, IPK Publishing house of standards, 2002. 5 p.
20. *Mashiny Elektricheskie: spravochnik* [Electric machines: reference book]. T. 3: Mashiny elektricheskie bolshoy moshchnosti. № 2: Elektrodvigateli sinkhronnye, generatory sinkhronnye [Vol. 3. Electric Power Machines. No. 2. Synchronous electric motors, synchronous generators]. Moscow, VNIStandartelektro Publ., 1990. 182 p.
21. *Mashiny Elektricheskie: spravochnik* [Electric machines: reference book]. T. 3: Mashiny elektricheskie bolshoy moshchnosti. № 1: Elektrodvigateli asinkhronnye [Vol. 3. Electric Power Machines. No. 1. Asynchronous electric motors]. Moscow, VNIStandartelektro Publ., 1990. 263 p.
22. *Privody mekhanicheskikh ustroystv* [Drives of mechanical devices]. Available at: <https://www.energy.siemens.com/ru/ru/mechanical-drives/gas-turbines/> (accessed 7 February 2018).
23. *Instruktsiya po ekspluatatsii EGPA-4,0/8200–56/1,26-P* [Operating instructions EGPA-4,0/8200–56 / 1,26-R]. PC «Gazprom transgaz Tomsk, 2001. 73 p.
24. Aristov A.V., Aristova L.I., Ekkert I.A. The control system of electric vibrating motor under the potential phase modulation. *Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (ME-ACS): Proc. of the International Conference*. Tomsk, 2015. 4 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414854
25. Glazachev A.V., Dementiev Y.N., Rakov I.V., Umurzakova A.D. An Asynchronous Electric Drive with the Indirect Control of the Output Variables. *MATEC Web of Conferences*, 2017. Vol. 91. 6 p. DOI: 10.1051/mateconf/20179101039
26. Chernyshov A.Yu., Dementiev Yu.N., Chernyshov I.A. *Elektroprivod peremennogo toka* [Electric drive of alternating current]. Tomsk, TPU Publ. house, 2015. 210 p.
27. Bezv D., Payuk L., Voronina N. The Controlled Electric Drive of the Automatic Cooling System of the Engine Room on a Vessel. *MATEC Web of Conferences*, 2017. Vol. 91. DOI: 10.1051/mateconf/20179101037
28. Sokolova I.Yu., Tesleva E.P. Nasosy, ventilyatory, kompressory (Nagnetateli) [Pumps, fans, compressors (Superchargers)]. *Mezhdunarodny zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniya*, 2016, no. 6 (1), pp. 125–128. Available at: <http://www.expeducation.ru/ru/article/view?id=10174> (accessed: 22 May 2018).

Received: 16 October 2018.

Information about the authors

Lyubov A. Payuk, Cand. Sc., senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nataliya A. Voronina, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anatolij A. Logvinenko, electrician, Company «Energoneft Tomsk».