

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-2-155-165

УДК 621.51 (621.313)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ЕГО ДИАГНОСТИКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ТОКА СТАТОРА ПРИВОДНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

THE FAILURE MODELING OF PUMP-COMPRESSOR EQUIPMENT AND THE DIAGNOSTIC TECHNIC BASED ON THE ANALYSIS OF THE STATOR CURRENT OF THE ELECTRIC MOTOR DRIVE

Семыкина Ирина Юрьевна¹,

д.т.н., доцент, профессор кафедры электропривода и автоматизации, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru
Irina Yu. Semykina¹, Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of the Electric Drive and Automation

Кипервассер Михаил Вениаминович²,

к.т.н., доцент кафедры электротехники, электропривода и промышленной электроники, e-mail: kipervasser2012@yandex.ru

Mikhail V. Kipervasser², Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department Electrical and Electronic Equipment

Герасимук Александр Владимирович²,

аспирант кафедры электротехники, электропривода и промышленной электроники, e-mail: heavymetal7200@gmail.com

Alexander V. Gerasimuk², Postgraduate Student, the Department of Electrical and Electronic Equipment

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya Street, Kemerovo, 650000, Russian Federation

² Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.

²Siberian State Industrial University, 42, Kirova Street, Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Аннотация: В статье рассмотрен метод обнаружения неисправности насосно-компрессорного оборудования с помощью анализа тока статора приводного электродвигателя. Произведён краткий анализ существующих типов защит оборудования и оценена актуальность рассматриваемого метода, оценены его преимущества. Рассмотрена сущность метода, его физическое обоснование. Приведены математические модели агрегатов насосно-компрессорного оборудования. Для подтверждения работоспособности предложенного метода защиты выполнено математическое моделирование турбокомпрессорной установки в условиях аварийных режимов работы, а именно: износа зубчатой пары мультипликатора, расцентровки валов агрегатов установки, помпажа турбокомпрессора. Для первых двух ситуаций получены спектрограммы тока статора, для помпажа - диаграмма тока статора. Проведено моделирование работы насосной установки в условиях попадания в насос постороннего предмета. Получена диаграмма тока фазы статора. Произведён анализ полученных данных и сделаны выводы о наличии характерных особенностей для каждой из неисправностей, которые обуславливают возможность идентификации каждой из них по току статора при его анализе. Оценена применимость метода для другого оборудования.

Abstract: The article considers a method for detecting a fault in a turbo-compressor unit by analysing the stator current of the drive motor. The brief description of the existing types of equipment protection is given, and the relevance of the proposed method is evaluated. Also, the advantages of this method are assessed. The essence of the method and its physical substantiation are considered. Mathematical models of pump-compressor equip-

ment are given. To prove the efficiency of the proposed protection method, the authors use the mathematical simulation of the turbo-compressor unit in the conditions of emergency operation modes, namely: the wear and tear of the multiplier gear pair, the shaft misalignment of the installation units, the surging of the turbocharger. For the first two situations, the spectrograms of the stator current are obtained, and for surging - the stator current diagram are given. Modeling of the pumping unit performance in the conditions of a foreign object falling into the pump is carried out. The diagram of the stator phase current is obtained. The analysis of the obtained simulation data is made and conclusions are drawn about the presence of characteristic features for each of the faults that make it possible to identify each of them by stator current during its analysis. The applicability of the method to other equipment is estimated.

Ключевые слова: турбокомпрессор, мультипликатор, синхронный двигатель, неисправность, контроль электрических и механических параметров, функциональная схема.

Key words: turbocompressor, multiplier, synchronous motor, malfunction, control of electrical and mechanical parameters, functional.

Введение

Насосно-компрессорное оборудование широко применяется в различных объектах промышленности и коммунального хозяйства. К таковым относятся нефте-газоперекачивающие станции, станции воздухо-разделения, городские насосные станции, предприятия черной и цветной металлургии, горнодобывающие предприятия. Насосы и компрессоры представлены на этих объектах большим разнообразием конструктивных исполнений и мощностей, работают в различных эксплуатационных условиях, имеют разные категории ответственности.

Наиболее крупные и мощные представители насосно-компрессорного оборудования являются ответственными и энергонапряженными агрегатами, к которым предъявляются жесткие требования по надежности, безопасности работы и обслуживания. Это обусловлено большими экономическими потерями, остановкой производства, угрозой жизни и здоровью граждан, прямо или косвенно связанными с их работой, в случае аварийной ситуации. К таким объектам относятся насосные станции систем водоснабжения населённых пунктов, турбокомпрессорные установки кислородных станций, насосы водоотлива горнодобывающих предприятий.

Как правило, электродвигатели привода насосно-компрессорного оборудования снабжают комплексом релейных защит от ненормальных и аварийных режимов работы. Минимальные состав комплекса защит определяется Правилами устройства электроустановок. Дополнительные требования к защитами определяются особенностями производства и технологического процесса конкретной установки. Однако, комплекс защит электродвигателя защищает только сам электродвигатель от ненормальных и аварийных электрических режимов (короткие замыкания, перегрузка, обрывы фаз, асинхронный ход, повышенное или пониженное напряжение и т.д.) и никак не диагностируют неисправность в механической части [1, 2].

Что касается технологических защит, то они определяют только недопустимые режимы работы рабочей машины с точки зрения технологического процесса (например, сухой ход насоса). Такие защиты имеют в своём составе значительное количество элементов [3], что снижает их надёжность. В частности, неисправность звена регистрации (датчика и линии связи его с системой защиты) может парализовать работу защиты.

Метод анализа тока статора электродвигателя [4] позволяет решить данные проблемы. Он основан на возможности контроля преобразования видов энергии в электрической машине. Механический переходный процесс, сопровождаемый колебаниями мощности нагрузки на валу электродвигателя, отражается в виде электрического переходного процесса в цепи тока статора и может быть зарегистрирован. При этом не требуется установка дополнительных датчиков, так как в этой роли выступает электродвигатель и элементы цепи его питания.

Математическая модель

При моделировании аварийных режимов работы насосно-компрессорного оборудования используются математические модели электродвигателей, мультипликаторов, центробежных насосов, компрессоров.

Для построения моделей как синхронных, так и асинхронных электродвигателей, как правило, используются уравнения Парка-Горева и преобразование Кларка [5, 6]. Этот метод позволяет уменьшить число уравнений системы, уйти от периодических коэффициентов, зависимости индуктивностей от угла поворота ротора. Однако, при исследовании электродвигателя в условиях несимметричных режимов (несимметрия обмоток, обрывы фаз, перекосы питающих напряжений, перекосы нагрузки по фазам для генераторов) имеет место значительная погрешность результатов вычислений [6, 7, 8]. Этот фактор обуславливает необходимость разработки более точных моделей в естественных фазных координатах a-b-c.

Синхронная машина с демпферными обмотками описывается следующей системой дифференциальных уравнений [1, 6, 9]:

$$\begin{cases} d\psi_a/dt + r_a i_a = U_a; & d\psi_f/dt + r_f i_f = U_f; & M_{\Sigma M} = \psi_a i_a + \psi_b i_b + \psi_c i_c; \\ d\psi_b/dt + r_b i_b = U_b; & d\psi_{yd}/dt + r_{yd} i_{yd} = 0; & M_{\Sigma M} = M_c + J(d\omega/dt); \\ d\psi_c/dt + r_c i_c = U_c; & d\psi_{yq}/dt + r_{yq} i_{yq} = 0; & \omega = d\gamma/dt, \end{cases} \quad (1)$$

где U_a, U_b, U_c – напряжения на зажимах обмотки статора; $\psi_a, \psi_b, \psi_c, i_a, i_b, i_c$ – потокосцепления и токи обмоток фаз статора; r_a, r_b, r_c – активное сопротивление обмоток фаз статора; U_f – напряжение на зажимах обмотки возбуждения; ψ_f, i_f – потокосцепление и ток обмотки возбуждения; r_f – активное сопротивление обмотки возбуждения; $\psi_{yd}, \psi_{yq}, i_{yd}, i_{yq}$ – потокосцепления и токи демпферных обмоток по продольной и поперечной осям соответственно; r_{yd}, r_{yq} – активное сопротивления демпферной обмотки по продольной и поперечной осям; M – электромагнитный момент, M_c – момент сопротивления нагрузки, J – момент инерции вращающихся масс, γ – угловое положение ротора.

Первые три уравнения системы (1) – уравнения равновесия обмоток статора. Четвертое, пятое, шестое – уравнения равновесия обмотки возбуждения и демпферных обмоток по продольной и поперечной осям соответственно. Седьмое уравнение – описывает механическую часть машины, а восьмое – устанавливает связь между потокосцеплениями, токами, углом нагрузки θ и электромагнитным моментом. Последнее уравнение – описывает угловое положение ротора.

Выражая потокосцепления через индуктивности обмоток и токи получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \psi_a = l_a i_a + l_{ab} i_b + l_{ac} i_c + l_{af} i_f + l_{ayd} i_{yd} + l_{ayq} i_{yq}; \\ \psi_b = l_{ba} i_a + l_b i_b + l_{bc} i_c + l_{bf} i_f + l_{byd} i_{yd} + l_{byq} i_{yq}; \\ \psi_c = l_{ca} i_a + l_{cb} i_b + l_c i_c + l_{cf} i_f + l_{cyd} i_{yd} + l_{cyq} i_{yq}; \\ \psi_f = l_{fa} i_a + l_{fb} i_b + l_{fc} i_c + l_f i_f + l_{fyd} i_{yd} + l_{fyq} i_{yq}; \\ \psi_{yd} = l_{yda} i_a + l_{ydb} i_b + l_{ydc} i_c + l_{ydf} i_f + l_{ydyd} i_{yd}; \\ \psi_{yq} = l_{yqa} i_a + l_{yqb} i_b + l_{yqc} i_c + l_{yqf} i_f + l_{yqyd} i_{yd}. \end{cases} \quad (2)$$

где $l_a, l_b, l_c, l_{ab}, l_{bc}, l_{ca}$ – индуктивности и взаимные индуктивности статорных обмоток; $l_f, l_{fa}, l_{fb}, l_{fc}, l_{fyd}, l_{fyq}$ – индуктивность обмотки возбуждения и её взаимные индуктивности со статорными и демпферными обмотками по продольной и поперечной осям; $l_{yd}, l_{yq}, l_{yda}, l_{ydb}, l_{ydc}, l_{ydf}, l_{yqa}, l_{yqb}, l_{yqc}$ – индуктивности и взаимные индуктивности по продольной и поперечной осям демпферных обмоток с обмотками статора и обмоткой возбуждения. При этом: $L_f = const$; $L_{yd} = const$; $L_{yq} = const$.

Индуктивности имеют зависимости от углов поворота ротора и определяются известным способом [6].

Работа с непреобразованными дифференциальными уравнениями, решение их классическими методами требует значительного количества вычислительных ресурсов. Удобнее воспользоваться операторным методом [10].

Преобразуем систему (1), записав ее с использованием оператора p , после чего для удобства компьютерной обработки модели преобразуем ее в дискретную форму. Для этого воспользуемся теорией цифровой обработки сигнала, а именно методом билинейного преобразования (Метод Трастиса) [11], который устанавливает следующую связь между операторами p и z :

$$p = \frac{2}{T} \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right), \quad (3)$$

где T – период дискретизации.

Применяя преобразование (3) к системе (1), записанной в операторной форме, получим:

$$\begin{cases}
\psi_a(z) \frac{2}{T} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) = U_a(z) - r_a i_a(z); \\
\psi_b(z) \frac{2}{T} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) = U_b(z) - r_b i_b(z); \\
\psi_c(z) \frac{2}{T} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) = U_c(z) - r_c i_c(z); \\
\psi_f(z) \frac{2}{T} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) = U_f(z) - r_f i_f(z); \\
\psi_{yd}(z) \frac{2}{T} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) = -r_{yd} i_{yd}(z); \\
\psi_{yq}(z) \frac{2}{T} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) = -r_{yq} i_{yq}(z); \\
M_{\Sigma M}(z) = \psi_a(z) i_a(z) + \psi_b(z) i_b(z) + \psi_c(z) i_c(z); \\
M_{\Sigma M}(z) = M_c(z) + J \cdot \frac{2}{T} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) \cdot \omega(z); \\
\frac{2}{T} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) \cdot \gamma(z) = \omega(z),
\end{cases} \quad (4)$$

После преобразования системы (4) с учетом (2) получим уравнения:

$$\begin{aligned}
U_a(k) = & \left(-r_a - \frac{2l_a}{T} \right) i_a(k) - \frac{2l_{ab}}{T} i_b(k) - \frac{2l_{ac}}{T} i_c(k) - \frac{2l_{af}}{T} i_f(k) - \frac{2l_{ayd}}{T} i_{yd}(k) - \frac{2l_{ayq}}{T} i_{yq}(k) + \\
& \left(-r_a + \frac{2l_a}{T} \right) i_a(k-1) + \frac{2l_{ab}}{T} i_b(k-1) + \frac{2l_{ac}}{T} i_c(k-1) + \frac{2l_{af}}{T} i_f(k-1) + \frac{2l_{ayd}}{T} i_{yd}(k-1) + \\
& + \frac{2l_{ayq}}{T} i_{yq}(k-1) + U_a(k-1);
\end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
U_b(k) = & -\frac{2l_{ba}}{T} i_a(k) - \left(r_b + \frac{2l_b}{T} \right) i_b(k) - \frac{2l_{bc}}{T} i_c(k) - \frac{2l_{bf}}{T} i_f(k) - \frac{2l_{byd}}{T} i_{yd}(k) - \frac{2l_{byq}}{T} i_{yq}(k) + \\
& + \frac{2l_{ba}}{T} i_a(k-1) + \left(-r_b + \frac{2l_b}{T} \right) i_b(k-1) + \frac{2l_{bc}}{T} i_c(k-1) + \frac{2l_{bf}}{T} i_f(k-1) + \frac{2l_{byd}}{T} i_{yd}(k-1) + \\
& + \frac{2l_{byq}}{T} i_{yq}(k-1) + U_b(k-1);
\end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
U_c(k) = & -\frac{2l_{ca}}{T} i_a(k) - \frac{2l_{cb}}{T} i_b(k) - \left(r_c + \frac{2l_c}{T} \right) i_c(k) - \frac{2l_{cf}}{T} i_f(k) - \frac{2l_{cyd}}{T} i_{yd}(k) - \frac{2l_{cyq}}{T} i_{yq}(k) + \\
& \left(-r_c + \frac{2l_{ca}}{T} \right) i_a(k-1) + \frac{2l_{cb}}{T} i_b(k-1) + \frac{2l_c}{T} i_c(k-1) + \frac{2l_{cf}}{T} i_f(k-1) + \frac{2l_{cyd}}{T} i_{yd}(k-1) + \\
& + \frac{2l_{cyq}}{T} i_{yq}(k-1) + U_c(k-1);
\end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
U_f(k) = & -\frac{2l_{fa}}{T} i_a(k) - \frac{2l_{fb}}{T} i_b(k) - \frac{2l_{fc}}{T} i_c(k) - \left(r_f + \frac{2l_f}{T} \right) i_f(k) - \frac{2l_{fyd}}{T} i_{yd}(k) + \\
& + \frac{2l_{fa}}{T} i_a(k-1) + \frac{2l_{fb}}{T} i_b(k-1) + \frac{2l_{fc}}{T} i_c(k-1) + \left(-r_f + \frac{2l_f}{T} \right) i_f(k-1) + \frac{2l_{fyd}}{T} i_{yd}(k-1) + U_f(k-1);
\end{aligned} \quad (8)$$

$$i_{yd}(z) = -\left(\frac{2l_{yda}}{T \cdot r_{yd}}\right)i_a(k) - \left(\frac{2l_{ydb}}{T \cdot r_{yd}}\right)i_b(k) - \left(\frac{2l_{ydc}}{T \cdot r_{yd}}\right)i_c(k) - \left(\frac{2l_{yfd}}{T \cdot r_{yd}}\right)i_f(k) - \left(\frac{2l_{ydl}}{T \cdot r_{yd}}\right)i_{yd}(k) + \\ + \left(\frac{2l_{yda}}{T \cdot r_{yd}}\right)i_a(k-1) + \left(\frac{2l_{ydb}}{T \cdot r_{yd}}\right)i_b(k-1) + \left(\frac{2l_{ydc}}{T \cdot r_{yd}}\right)i_c(k-1) + \left(\frac{2l_{yfd}}{T \cdot r_{yd}}\right)i_f(k-1) - i_{yd}(k-1); \quad (9)$$

$$i_{yq}(z) = -\left(\frac{2l_{yqa}}{T \cdot r_{yq}}\right)i_a(k) - \left(\frac{2l_{yqb}}{T \cdot r_{yq}}\right)i_b(k) - \left(\frac{2l_{yqc}}{T \cdot r_{yq}}\right)i_c(k) - \left(\frac{2l_{yqf}}{T \cdot r_{yq}}\right)i_f(k) + \\ + \left(\frac{2l_{yqa}}{T \cdot r_{yq}}\right)i_a(k-1) + \left(\frac{2l_{yqb}}{T \cdot r_{yq}}\right)i_b(k-1) + \left(\frac{2l_{yqc}}{T \cdot r_{yq}}\right)i_c(k-1) + \left(\frac{2l_{yqf}}{T \cdot r_{yq}}\right)i_f(k-1) - i_{yq}(k-1); \quad (10)$$

$$M_{\Sigma M}(z) = \left\{ \left[l_{ia}i_a(k) + l_{ib}i_b(k) + l_{ic}i_c(k) + l_{if}i_f(k) + l_{ayd}i_{yd}(k) + l_{ayq}i_{yq}(k) \right] i_a(k) + \right. \\ + \left[l_{ia}i_a(k-1) + l_{ib}i_b(k-1) + l_{ic}i_c(k-1) + l_{if}i_f(k-1) + l_{ayd}i_{yd}(k-1) + l_{ayq}i_{yq}(k-1) \right] i_a(k-1) \Big\} + \\ + \left\{ \left[l_{ba}i_a(k) + l_{bb}i_b(k) + l_{bc}i_c(k) + l_{bf}i_f(k) + l_{byd}i_{yd}(k) + l_{byq}i_{yq}(k) \right] i_b(k) + \right. \\ + \left[l_{ba}i_a(k-1) + l_{bb}i_b(k-1) + l_{bc}i_c(k-1) + l_{bf}i_f(k-1) + l_{byd}i_{yd}(k-1) + l_{byq}i_{yq}(k-1) \right] i_b(k-1) \Big\} + \\ + \left\{ \left[l_{ca}i_a(k) + l_{cb}i_b(k) + l_{cc}i_c(k) + l_{cf}i_f(k) + l_{cyd}i_{yd}(k) + l_{cyq}i_{yq}(k) \right] i_c(k) + \right. \\ + \left[l_{ca}i_a(k-1) + l_{cb}i_b(k-1) + l_{cc}i_c(k-1) + l_{cf}i_f(k-1) + l_{cyd}i_{yd}(k-1) + l_{cyq}i_{yq}(k-1) \right] i_c(k-1) \Big\} + \\ + M_{\Sigma M}(k-1); \quad (11)$$

$$\omega(k) = \frac{1}{2J}T \cdot M_{\Sigma M}(z) - \frac{1}{2J}T \cdot M_c(k) - \frac{1}{2J}T \cdot M_{\Sigma M}(k-1) - \frac{1}{2J}T \cdot M_c(k-1) + \omega(k-1); \quad (12)$$

$$\gamma(k) = \frac{1}{2}T\omega(k) - \frac{1}{2}T\omega(k-1) - \gamma(k-1), \quad (13)$$

где k – номер отсчета.

Уравнения (5-13) эквивалентны двум векторным уравнениям, одно из которых определяет электрическую часть электродвигателя, а второе – механическую:

$$\begin{bmatrix} U_a(k) \\ U_b(k) \\ U_c(k) \\ U_f(k) \\ U_{yd}(k) \\ U_{yq}(k) \end{bmatrix} = A(k) \begin{bmatrix} i_a(k) \\ i_b(k) \\ i_c(k) \\ i_f(k) \\ i_{yd}(k) \\ i_{yq}(k) \end{bmatrix} + B(k-1) \begin{bmatrix} i_a(k-1) \\ i_b(k-1) \\ i_c(k-1) \\ i_f(k-1) \\ i_{yd}(k-1) \\ i_{yq}(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_a(k-1) \\ U_b(k-1) \\ U_c(k-1) \\ U_f(k-1) \\ U_{yd}(k-1) \\ U_{yq}(k-1) \end{bmatrix}; \\ M_{\Sigma M}(k) = M_{\Sigma Ma}(k) + M_{\Sigma Mb}(k) + M_{\Sigma Mc}(k), \quad (14)$$

где $M_{\Sigma Ma}(k)$, $M_{\Sigma Mb}(k)$, $M_{\Sigma Mc}(k)$ – моменты, создаваемые фазами а, b, с; А и В – матричные коэффициенты, составленные из коэффициентов перед токами в системе (14).

Моменты выражаются векторными выражениями:

Для фазы а:

$$M_{\mathcal{M}a}(k) = \begin{bmatrix} l_a(k) \\ l_{ab}(k) \\ l_{ac}(k) \\ l_{af}(k) \\ l_{ayd}(k) \\ l_{ayq}(k) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a(k) \\ i_b(k) \\ i_c(k) \\ i_f(k) \\ i_{yd}(k) \\ i_{yq}(k) \end{bmatrix} i_a(k) + \begin{bmatrix} l_a(k-1) \\ l_{ab}(k-1) \\ l_{ac}(k-1) \\ l_{af}(k-1) \\ l_{ayd}(k-1) \\ l_{ayq}(k-1) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a(k-1) \\ i_b(k-1) \\ i_c(k-1) \\ i_f(k-1) \\ i_{yd}(k-1) \\ i_{yq}(k-1) \end{bmatrix} i_a(k-1) + M_{\mathcal{M}a}(k-1) \quad (15)$$

Для фазы b:

$$M_{\mathcal{M}b}(k) = \begin{bmatrix} l_{ba}(k) \\ l_b(k) \\ l_{bc}(k) \\ l_{bf}(k) \\ l_{byd}(k) \\ l_{byq}(k) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a(k) \\ i_b(k) \\ i_c(k) \\ i_f(k) \\ i_{yd}(k) \\ i_{yq}(k) \end{bmatrix} i_b(k) + \begin{bmatrix} l_{ba}(k-1) \\ l_b(k-1) \\ l_{bc}(k-1) \\ l_{bf}(k-1) \\ l_{byd}(k-1) \\ l_{byq}(k-1) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a(k-1) \\ i_b(k-1) \\ i_c(k-1) \\ i_f(k-1) \\ i_{yd}(k-1) \\ i_{yq}(k-1) \end{bmatrix} i_b(k-1) + M_{\mathcal{M}a}(k-1) \quad (16)$$

Для фазы c:

$$M_{\mathcal{M}c}(k) = \begin{bmatrix} l_{ca}(k) \\ l_{cb}(k) \\ l_c(k) \\ l_{cf}(k) \\ l_{cyd}(k) \\ l_{cyq}(k) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a(k) \\ i_b(k) \\ i_c(k) \\ i_f(k) \\ i_{yd}(k) \\ i_{yq}(k) \end{bmatrix} i_c(k) + \begin{bmatrix} l_{ca}(k-1) \\ l_{cb}(k-1) \\ l_c(k-1) \\ l_{cf}(k-1) \\ l_{cyd}(k-1) \\ l_{cyq}(k-1) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a(k-1) \\ i_b(k-1) \\ i_c(k-1) \\ i_f(k-1) \\ i_{yd}(k-1) \\ i_{yq}(k-1) \end{bmatrix} i_c(k-1) + M_{\mathcal{M}c}(k-1) \quad (17)$$

Использование данной модели повысит точность компьютерного моделирования с учетом возможных несимметричных режимов работы двигателя, а также будет удобным при последующем проектировании цифровых устройств защиты.

Расчет параметров исследуемого объекта

Мультипликатор компрессорной установки обычно выполняется одноступенчатым, с шевронной цилиндрической передачей [3]. Как и в любом механическом устройстве, в мультипликаторе есть потеря мощности ΔN_M . Её можно представить, как сумму двух мощностей:

$$\Delta N_M = \Delta N_{MC} + \Delta N_{MD}, \quad (19)$$

где ΔN_{MC} – статическая потеря мощности (потеря на трение в подшипниках и зубчатой передаче), кВт; N_{MD} – динамическая потеря мощности (проявляется в динамических режимах, обусловлена наличием вращающихся масс зубчатых колёс).

Статическая потеря мощности определяется через КПД элементов мультипликатора [12]:

$$\Delta N_{MC} = N_K (1 - \eta_3^m \eta_{\Pi}^n), \quad (20)$$

где N_K – механическая мощность, которую необходимо подвести к турбокомпрессору от приводного двигателя при номинальных условиях работы, МВт; η_3 – КПД зубчатой передачи; η_{Π} – КПД подшипников качения; n – количество подшипников качения в мультипликаторе, m – число ступеней мультипликатора.

Динамическая потеря мощности определяется как сумма динамических мощностей, затрачиваемых на изменение состояния (разгон, торможение) каждого из зубчатых колёс и валов:

$$\Delta N_{MD} = \left(J_M \frac{d\omega}{dt} \right) \frac{\pi n_{эд}}{30} = \frac{d\omega}{dt} \left(\sum_{i=1}^k k_i J_{3Ki} + k_j \sum_{j=1}^l J_{Bj} \right) \frac{\pi n_{эд}}{30}, \quad (21)$$

где J_M – полный момент инерции мультипликатора, приведённым к валу электродвигателя, кг·м²; J_{3Ki}

– моменты инерции каждого отдельно зубчатого колеса мультипликатора, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; J_{Bj} – моменты инерции валов мультипликатора, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; k – число зубчатых колёс мультипликатора; j – число валов мультипликатора; k_i – коэффициент приведения инерции i -го колеса к валу двигателя; k_j – коэффициент приведения инерции j -го вала в валу двигателя.

Как и для мультипликатора, для турбокомпрессора справедливо аналогичное выражение:

$$N_K = N_{KC} + N_{KD}, \quad (22)$$

где N_{KC} – мощность, затрачиваемая турбокомпрессором на сжатие рабочей среды, а также на преодоление механических потерь от трения, кВт; N_{KD} – динамическая механическая мощность турбокомпрессора (проявляется в динамических режимах, обусловлена наличием вращающейся массы ротора), кВт.

Первое слагаемое формулы (22) определяется известным выражением [13-15]:

$$N_K = \left[(P_{ATM} Q_K) / (\eta_{ИЗ} \eta_M) \right] \ln(P_K / P_{ATM}), \quad (23)$$

где $\eta_{ИЗ}$ – изотермический КПД; η_M – механический КПД; P_{ATM} – атмосферное давление, кПа; $P_K = P_{Квб} + P_{ATM}$ – конечное давление воздуха на выходе из турбокомпрессора, кПа; Q_K – производительность турбокомпрессора, $\text{м}^3/\text{с}$.

$$\begin{cases} Q_K = (n/n_H) Q_{KH}; \\ \lg \varepsilon = (n/n_H)^2 \lg \varepsilon_H, \end{cases} \quad (24)$$

где Q_{KH} – номинальная производительность компрессора насоса, $\text{м}^3/\text{с}$; ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; n_H – номинальная частота вращения, об/мин; n – частота вращения текущая, об/мин; $\varepsilon = P_K / P_{ATM}$ – отношение давления компрессора к атмосферному; $\varepsilon_H = P_{HK} / P_{ATM}$ – отношение номинального давления компрессора к атмосферному.

С учётом выражений (24) формула (23) примет вид:

$$N_K = \left\{ \left[(P_{ATM} Q_K) / (\eta_{ИЗ} \eta_M) \right] \ln(P_K / P_{ATM}) \right\} (n/n_H)^3, \quad (25)$$

Динамическая механическая мощность турбокомпрессора определяется по формуле:

$$\Delta N_{KD} = \frac{\pi n_{эд}}{30} J_{кр} \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dt} \left[k \left(J_{KBi} + \sum_{i=1}^n J_{KKi} \right) \right] \frac{\pi n_{эд}}{30}, \quad (26)$$

где J_{PH} – полный момент инерции ротора компрессора, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; J_{BK} – момент инерции вала компрессора, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; J_{KKi} – момент инерции i -го вала компрессора, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; k – коэффициент приведения момента инерции к валу двигателя.

Математическая модель центробежного насоса рассматривается аналогичным образом, как и для компрессора, на основании соответствующих выражений для мощностей и моментов:

$$N_H = N_{HC} + N_{HD}, \quad (27)$$

где N_{HC} – мощность, затрачиваемая насосом на перекачку жидкости, а также на преодоление механических потерь от трения, кВт; N_{HD} – динамическая механическая мощность насоса, кВт.

Мощность N_{HC} рассчитывается по формуле [16]

$$N_{HC} = Q \rho g H / \eta, \quad (28)$$

где η – К.П.Д. насоса; Q – подача насоса, $\text{м}^3/\text{ч}$; ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; H – напор насоса, м; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$ η – К.П.Д. насоса, n – частота вращения насоса, об/мин.

Напор и производительность насоса, в зависимости от частоты вращения колёс, определяются выражениями [17]:

$$Q = (n/n_H) Q_H, \quad (29)$$

где Q_H – номинальная производительность насоса, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$$H = (n/n_H)^2 H_H, \quad (30)$$

где H_H – номинальный напор насоса, м.

С учётом (29) и (30) формула (28) примет вид:

$$N_{HC} = (Q_H \rho g H_H / \eta) (n/n_H)^3. \quad (31)$$

Динамическая механическая мощность насоса определяется по формуле:

$$\Delta N_{\text{нд}} = \frac{\pi n_{\text{эл}}}{30} J_{\text{нр}} \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dt} \left(J_{\text{нр}} + \sum_{i=1}^n J_{\text{нр}i} \right) \frac{\pi n_{\text{эл}}}{30}, \quad (32)$$

где $J_{\text{нр}}$ – полный момент инерции ротора насоса, кг·м²; $J_{\text{нр}i}$ – момент инерции вала насоса, кг·м²; $J_{\text{нр}i}$ – момент инерции i -го колеса насоса, кг·м²; k – коэффициент приведения момента инерции к валу двигателя.

Результаты вычислительных экспериментов

Для подтверждения выдвинутого положения о возможности диагностирования неисправностей мультипликатора методом анализа тока статора было проведено математическое моделирование процесса работы турбокомпрессорной установки в составе компрессора К-1500-62-2, мультипликатора Р-8000-1,49 и синхронного неявнополюсного электродвигателя СТД-10000-2, а также питающей сети мощностью 80МВА. В процессе моделирования имитировались следующие аварийные ситуации: износ зубчатой пары мультипликатора [18] (рисунок 1), расцентровка валов агрегатов установки (рисунки 2-3), помпаж турбокомпрессора [19] (рисунок 4).

Также было проведено моделирование насосной установки в составе АД-4000-95-2-С с двигателем СДН 2-16-59-6У3 с имитирование попадания в рабочее колесо насоса постороннего предмета массой 5 кг.

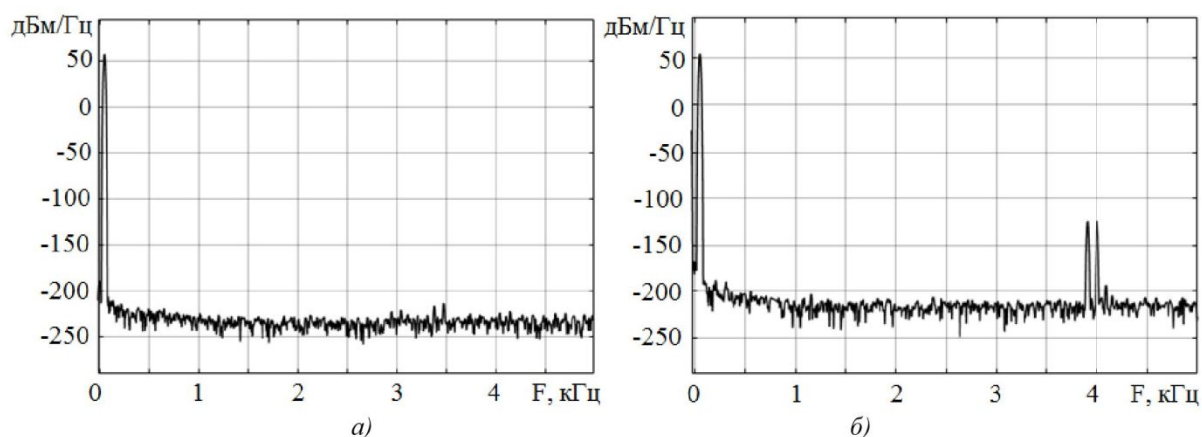


Рис. 1. Спектрограмма тока фазы статора при нормальном режиме работы (а) и при возникновении дефекта в мультипликаторе (б)

Fig. 1. The spectrograms of the stator current at the normal state (a) and in the emergency case (b)

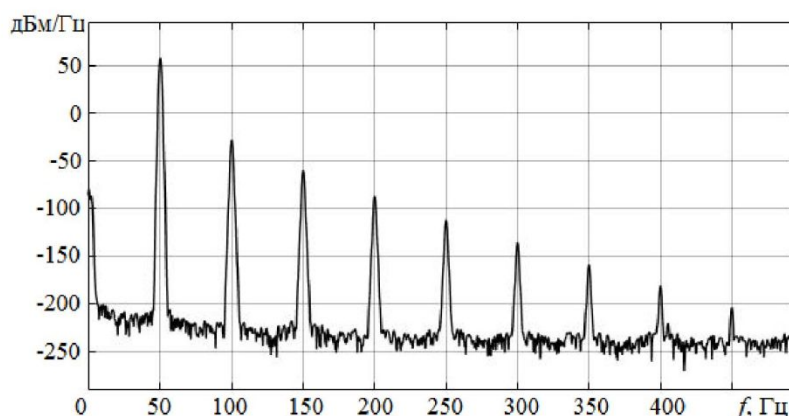


Рис. 2. Спектрограмма тока фазы статора при расцентровке валов электродвигателя и мультипликатора

Fig. 2. The spectrogram of the stator current at the shaft misalignment of the drive motor and the multiplier

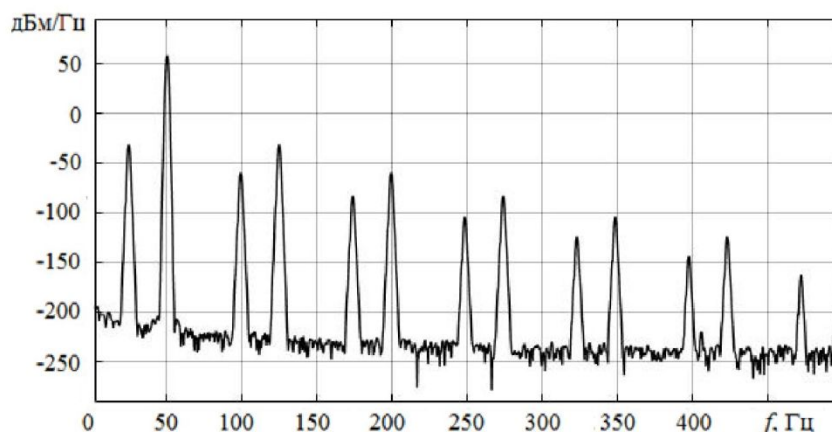


Рис. 3. Спектрограмма тока фазы статора при расцентровке валов мультипликатора и турбокомпрессора

Fig. 3. The spectrogram of the stator current at the shaft misalignment of the multiplier and the turbocharger

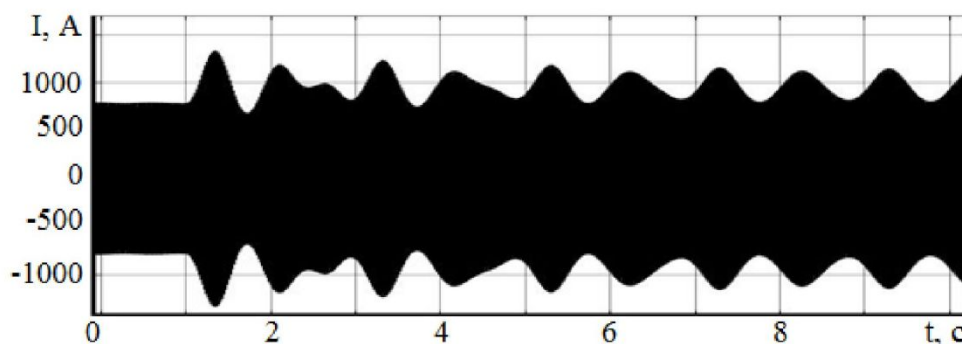


Рис. 4. Диаграмма тока в фазе приводного двигателя при моделировании помпажа турбокомпрессора

Fig. 4. The diagram of the stator phase current at the surging of the turbocharger

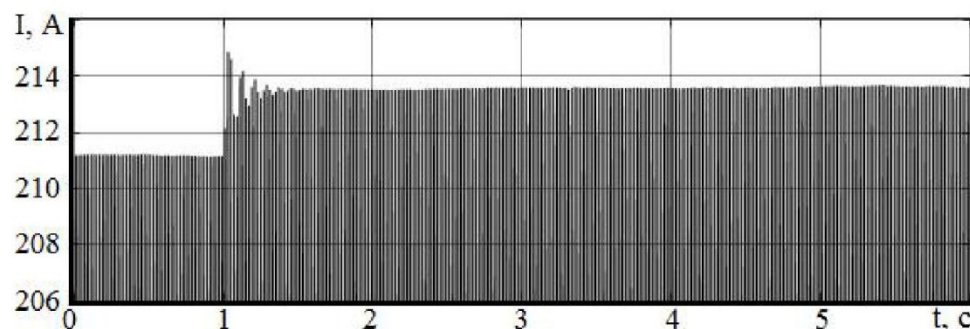


Рис. 5. Диаграммы токов фазы статора приводного двигателя насоса при попадании постороннего предмета

Fig. 5. The diagram of the stator phase current in case of foreign matter intrusion

По спектрограммам и диаграммам тока можно сделать следующие выводы:

В нормальном режиме работы в спектре тока статора присутствует только основная гармоническая составляющая тока – 50Гц. Остальные гармоники практически отсутствуют или представлены слабым сигналом (рисунок 1а). При работе двигателя с изношенным мультипликатором спектрограмма тока фазы статора существенно меняется (рисунок 1б). В окрестностях зубцовой частоты быстроходной шестерни (4кГц) появляются высшие гармоники.

При расцентровке валов агрегатов турбоустановки также появляются гармоники в токе статора (рисунки 2,3). При этом, при расцентровке вала электродвигателя и мультипликатора появляются гармоники, кратные основной частоте 50Гц, и различные вплоть до восьмой гармоники. Если же происходит расцен-

тровка валов мультипликатора и турбокомпрессора, то присутствуют уже как гармонические, так и интергармонические (не кратные 50 Гц) частоты. Данная особенность будет зависеть от частоты вращения выходного вала. Если она кратная частоте вращения вала двигателя, то такой особенности не наблюдается.

При помпаже происходят низкочастотные колебания тока статора (рисунок 4), с частотой в единицы герц и амплитудой до 1,6 номинального тока.

Заключение

По результатам проведенных выше исследований можно выделить характерные особенности для каждой из перечисленных неисправностей. При износе мультипликатора характерно появления высокочастотного спектра гармонических колебаний, в то время как при расцентровке валов спектр находится в диапазоне 50 – 500(600) Гц. Причём, по наличию в спектре интергармоник можно определить, центровка какой именно пары валов нарушена (при указанных ранее условиях). При помпаже компрессора колебания тока низкочастотные и большой амплитуды, что также является характерной особенностью для данной аварийной ситуации.

Для насосов применимость метода анализа тока имеет определённые границы. На основании изучения диаграммы 5 можно установить, что скачок тока при попадании постороннего предмета в рабочее колесо насоса возможен лишь для высокоскоростных насосов (приблизительно от 3000 об/мин) и выше. Для насосов же с частотой вращения до 1500 об/мин этот показатель мал и в случае диаграммы 5 будет соразмерен с эксплуатационными колебаниями тока, что затрудняет определение рассматриваемой неисправности токовым методом. Гармонический анализ также не даёт результатов и в рамках данной статьи не приводится.

Применение данного метода диагностики неисправностей возможно не только для турбокомпрессоров и высокоскоростных насосов, но также и для центробежных вентиляторов, сушильных барабанов, центрифуг и другого оборудования со спокойной нагрузкой, то есть там, где приводной электродвигатель потребляет из сети ток без резких скачков, обусловленных наличием активного и резкоизменяющегося момента сопротивления на валу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. – М.: Энергия, 1977. – 216 с.
2. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: ЭНАС, 2006. – 552 с.
3. Хисамеев И.Г. Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных турбокомпрессоров / И.Г. Хисамеев, В.А. Максимов. – Казань: Изд-во "ФЭН", 2010. – 671 с.
4. Gerasimuk A.V. Research into the impact of shafts misalignment of turbocompressor installation on power characteristics of a drive engine / A.V. Gerasimuk, M.V. Kipervasser // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – Vol. 45. – Art. 012011.
5. Ansari A.A. Mathematical Model of Asynchronous Machine in MATLAB Simulink / A.A. Ansari, D.M. Deshpande // International Journal of Engineering Science and Technology. – Vol. 2(5). – 2010. – pp. 1260-1267.
6. Сипайлов Г.А. Электрические машины (специальный курс) / Г.А. Сипайлов, Е.В. Кононенко, К.А. Хорьков. – М.: Высшая школа, 1987. – 287 с.
7. Krause P.C. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems / P.C. Krause, O. Wasynczuk and S.D. Sudhoff. – IEEE Press Series on power Engineering, 2004. – 613 p.
8. Полищук В.И. Развитие теории построения систем диагностики синхронных машин: дис. д-ра техн. наук. – Самара, 2016. – 292 с.
9. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
10. Лукас В.А. Теория автоматического управления: учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 416 с.
11. Rabiner L.R. Theory and Application of Digital Signal Processing / L.R. Rabiner and B. Gold. – Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1975. – 762 p.
12. Тюняев А.В. Детали машин: учебник, 2-е изд., испр. и доп. / А.В. Тюняев, В.П. Звездаков. – СПб.: Лань, 2013. – 736 с.
13. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики: учебник, 3-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2012. – 352 с.
14. Галеркин Ю.Б. Турбокомпрессоры: учеб. пособие / Ю.Б. Галеркин, Л.И. Козаченко. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 374 с.
15. Абдурашитов С.А. Насосы и компрессоры / С.А. Абдурашитов, А.А. Тупиченков. – М.: Недра, 1974. – 296 с.
16. Шлипченко З.С. Насосы, компрессоры, вентиляторы. – К.: Техніка, 1976. – 386 с.

17. Турк В.И. Насосы и насосные станции: учеб. для вузов / В.И. Турк, А.В. Минаев. – М.: Стройиздат, 1976. – 304 с.
18. Семыкина И.Ю. Исследование переходного процесса в цепи тока при дефекте мультипликатора турбокомпрессора и разработка структурной схемы системы обнаружения дефекта мультипликатора / И.Ю. Семыкина, М.В. Кипервассер, А.В. Герасимук // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 3. – С. 138-144.
19. Пугачёв Е.В. Исследование воздействия помпажа турбокомпрессора на энергетические характеристики приводного двигателя / Е.В. Пугачёв, М.В. Кипервассер, А.В. Герасимук // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – № 2(114). – С. 84-91.

REFERENCES

1. Slodarz M.I. Rezhimy raboty, releinaia zashchita i avtomatika sinkhronnykh elektrodvigateli [Modes of Operation, Relay Protection and Automation of Synchronous Electric Motors]. Moscow, 1977, 216 p.
2. Pravila ustroystva elektroustanovok [Rules on Design of Power Electric Installations]. Moscow, 2006, 552 p.
3. Khisameev I.G., Maksimov V.A. Proektirovanie i ekspluatatsiia promyshlennykh centrobezhnykh turbokompressorov [Design and Operation of Industrial Centrifugal Turbochargers]. Kazan, 2010, 671 p.
4. Gerasimuk A.V., Kipervasser M.V. Research into the impact of shafts misalignment of turbocompressor installation on power characteristics of a drive engine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, Vol. 45, Art. 012011.
5. Ansari A.A., Deshpande D.M. Mathematical Model of Asynchronous Machine in MATLAB Simulink. International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(5), 2010, pp. 1260-1267.
6. Sipailov G.A., Kononenko E.V., Horkov K.A. Elektricheskie mashiny (spetsialnyi kurs) [Electric Machines (special course)]. Moscow, 1987, 287 p.
7. Krause P.C., Wasynczuk O. and Sudhoff S.D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. IEEE Press Series on power Engineering, 2004, 613 p.
8. Polishchuk V.I. Razvitiie teorii postroeniia sistem diagnostiki sinkhronnykh mashin [Development of the Theory of Constructing Diagnostic Systems for Synchronous Machines], DSc thesis, Samara, 2016, 292 p.
9. Kovach K.P., Ratc I. Perehodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka [Transient Processes in AC Machines]. Moscow-Leningrad, 1963, 744 p.
10. Lukas V.A. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia [Theory of Automatic Control]. Moscow, 1990, 416 p.
11. Rabiner L.R. and Gold B. Theory and Application of Digital Signal Processing. Englewood Cliffs, 1975, 762 p.
12. Tyunyaev A.V., Zvezdakov V.P. Detali mashin [Machine Elements]. Saint Petersburg, 2013, 736 p.
13. Bystritsky G.F. Osnovy energetiki [Fundamentals of Energy]. Moscow, 2012, 352 p.
14. Galerkin Yu.B., Kozachenko L.I. Turbokompressory [Turbochargers]. Saint Petersburg, 2008, 374 p.
15. Abdurashitov S.A., Tupichenkov A.A. Nasosy i kompressory [Pumps and Compressors]. Moscow, 1974, 296 p.
16. Shlipchenko Z.S. Nasosy, kompressory, ventilatory [Pumps, Compressors, Fans]. Kiev, 1976, 386 p.
17. Turk V.I., Minaev A.V. Nasosy i nasosnye stantsii [Pumps and Pump Stations]. Moscow, 1976, 304 p.
18. Semykina I.Yu., Kipervasser M.V., Gerasimuk A.V. Vestneyk Chuvashskogo universiteta [Bulletin of the Chuvash University]. 2017, No. 3, pp. 138-144.
19. Pugachev EV, Kipervasser MV, Gerasimuk AV Vestneyk Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin KuzSTU], 2016, No. 2 (114), pp. 84-91.

Поступило в редакцию 02.04.2018

Received 02.04.2018