ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА «ВИРТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ» ДЛЯ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ВЫВОДЕ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ НА РЕЖИМ

APPLICATION OF THE «VIRTUAL TEMPERATURE SENSOR» ALGORITHM FOR ELECTRIC SUBMERSIBLE MOTOR IN BRINGING THE OIL-PRODUCING WELL ON TO STABLE PRODUCTION

М. Г. Волков
Maksim G. Volkov

ООО «РН-БашНИПИнефть»,
Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

RN-BashNIPIneft LLC,
Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Ю. В. Зейгман
Yuriy V. Zeigman

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
ООО «РН-БашНИПИнефть»,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
RN-BashNIPIneft LLC,
Ufa, Russian Federation

Анализ ремонтных работ установок электроприводных центробежных насосов (УЭЦН) для нефтедобывающих скважин показал, что основной причиной отказов погружных асинхронных электродвигателей (ПЭД) являются тепловые разрушения в результате перегрева обмотки статора электродвигателя и кабеля. Такой перегрев электродвигателя чаще всего является результатом несоблюдения принятых норм жидкостного охлаждения при условии снижения притока флюида из пласта в процессе освоения нефтедобывающей скважины или снижения дебита скважины в процессе эксплуатации. Перечисленные обстоятельства обуславливают важность достоверной оценки теплового состояния электродвигателя, особенно при его эксплуатации в осложнённых условиях, и в период освоения скважины. Анализ статистики оснащения нефтяных скважин системами погружной телеметрии показал, что в настоящее время только часть скважинного фонда ряда отечественных нефтяных компаний оснащена глубинными датчиками термоманометрической системы для температурного мониторинга работы ПЭД. При этом далеко не все из этих датчиков показывают корректные замеры. Поэтому работы в области разработки алгоритмов «виртуальных датчиков температуры» для оценки теплового режима работы двигателя путем интерпретации данных мониторинга электрических параметров ПЭД, давления и расхода флюида в скважине крайне актуальны. В статье предложена математическая модель теплообмена ПЭД с окружающей средой, на основе которой разработан алгоритм «виртуального датчика температуры». Эмпирическим путем получена корреляция для оценки коэффициента теплоотдачи ПЭД в виде функции от текущей силы тока, коэффициента теплоотдачи охлаждающего флюида и потери мощности двигателя на тепловыделение. Проведена верификация алгоритма «виртуального датчика температуры», которая показала, что расхождение расчетных и замеренных значений температуры ПЭД для анализируемой скважины Илишевского месторождения не превышает 3 %.

Ключевые слова

виртуальный датчик температуры;
установки электроприводных
центробежных насосов, погружные
асинхронные электродвигатели;
перегрев обмоток статора
электродвигателя; тепловой режим
эксплуатации электродвигателя;
коэффициент теплоотдачи
электродвигателя

The analysis of repair work of electric-driven centrifugal pump units for the oil-producing wells showed that the main cause of submersible asynchronous electric motors (SEM) failures is the thermal destruction due to overheating of the electric motor stator winding and cable. Such overheating of the electric motor is most frequently the result of non-compliance with the accepted norms of liquid cooling, provided that the inflow of fluid from the formation decreases during the development of the oil-producing well or the well flow rate decreases during operation. The listed circumstances determine the importance of a reliable assessment of the thermal state of the electric motor, especially during its operation in difficult conditions, and during the well development period. Statistical analysis of equipping oil wells with the submersible telemetry systems showed that currently only part of the well stock of certain domestic oil companies is equipped with the downhole sensors of the thermomanometric system for temperature monitoring of the submersible electric motor operation. Therefore, work in the area of the «virtual temperature sensors» algorithms development for assessing the thermal regime of the motor operation by interpreting the monitoring data of the submersible electric motor electrical parameters, pressure and the fluid flow rate in the well is extremely relevant. The article proposes a mathematical model of heat exchange between the submersible motor and the environment, on which the «virtual temperature sensor» algorithm has been developed. A correlation has been obtained empirically to estimate the SEM heat transfer coefficient as a function of the current amperage, the heat transfer coefficient of the cooling fluid and the engine power loss for heat release. The verification of the «virtual temperature sensor» algorithm was carried out, which showed that the discrepancy between the calculated and measured values of the SEM temperature for the analyzed well of the Ilishevskoye field does not exceed 3 %.

Введение

На сегодняшний день большинство скважинных установок электроприводных центробежных насосов (УЭЦН) для нефтяных скважин оснащены погружными асинхронными электродвигателями (ПЭД). Анализ проведения ремонтных работ УЭЦН [1] показал, что в основном отказы ПЭД происходят из-за перегрева обмотки статора двигателя и кабеля. Перегрев обмоток статора двигателя чаще всего является результатом несоблюдения принятых норм жидкостного охлаждения и условий эксплуатации ПЭД. Например, неправильный подбор типоразмера ПЭД под диаметр эксплуатационной колонны способен снизить скорость охлаждающего флюида в кольцевом зазоре между ПЭД и эксплуатационной колонной и, тем самым, уменьшить отвод тепла от корпуса электродвигателя. Другой причиной перегрева обмотки статора ПЭД может служить снижение притока флюида из пласта в процессе освоения нефтедобывающей скважины или снижение дебита скважины в процессе эксплуатации. Согласно стандарту на асинхронные погружные трёхфазные маслonaполненные электродвигатели, максимально допустимая температура обмотки статора не должна превышать: для двигателя обычного исполнения — 120 °С, а для

Keywords

virtual temperature sensor; electric-driven centrifugal pump units; submersible asynchronous electric motors; overheating of the electric motor stator winding; thermal regime of the electric motor operation; heat transfer coefficient of the electric motor

высокотемпературного — 150 °С [2]. Перечисленные обстоятельства обуславливают важность достоверной оценки теплового состояния электродвигателя, особенно при его эксплуатации в осложнённых условиях, и в период освоения скважины. Согласно нормативным документам, регламентирующим процесс освоения, вывод скважины на режим должен сопровождаться постоянным контролем температуры ПЭД. Возможны два варианта мониторинга температурного режима работы ПЭД при выводе скважины на режим: по косвенным измерениям объемного притока жидкости из пласта, необходимого для охлаждения электродвигателя [3], и путем непосредственного замера температуры корпуса электродвигателя с помощью специальных глубинных датчиков термоманометрической системы (ТМС).

Анализ статистики оснащения нефтяных скважин системами погружной телеметрии показал, что в настоящее время только часть скважинного фонда ряда отечественных нефтяных компаний оснащена глубинными датчиками ТМС для температурного мониторинга работы ПЭД. Поэтому исследования, направленные на развитие новых интеллектуальных подходов (в частности разработки алгоритмов «виртуального датчика темпера-

туры») для оценки температурного режима работы двигателя путем интерпретации данных мониторинга электрических параметров ПЭД, давления и расхода флюида в скважине, крайне актуальны.

Методика интерпретации параметров мониторинга скважины для оценки температуры ПЭД

Значительную роль в формировании температуры двигателя играют такие факторы, как температура обтекающего двигателя флюида [4]; коэффициент теплоотдачи газожидкостной смеси, зависящий от структуры и обводненности потока охлаждающего флюида [5]; коэффициент теплоотдачи двигателя; величина нагрузки на валу ПЭД и т.д. Текущую температуру двигателя через потери мощности на теплоотдачу в окружающую среду ΔP_{Di} можно выразить как сумму температур пластовой жидкости T_{nl} , температуры жидкости охлаждения T_{fi} и температуры поверхности двигателя T_{kopi}

$$T_{Di} = T_{nl} + T_{fi} + T_{kopi} = T_{nl} + \frac{\Delta P_{Di}}{Q_{Li} C_{PL} \rho_{Li} + Q_{gi} C_{Pg} \rho_{gi}} + \frac{\Delta P_{Di}}{U_i \pi D_D L_D}, \quad (1)$$

где $U_i = \left(\frac{D_D}{D_C \alpha_{fi}} + \frac{1}{\alpha_{Di}} \right)^{-1}$ — суммарный коэффициент теплоотдачи;

α_{fi} — коэффициент теплоотдачи охлаждающего флюида;

α_{Di} — коэффициент теплоотдачи электродвигателя;

Q_{Li} , Q_{gi} — объемные расходы жидкости и газа в области ПЭД соответственно;

C_{PLi} , C_{Pgi} — удельные теплоемкости жидкости и газа;

ρ_{Li} , ρ_{gi} — плотности жидкости и газа соответственно;

D_D — диаметр ПЭД;

L_D — длина ПЭД;

D_C — внутренний диаметр эксплуатационной колонны.

Приrost температуры охлаждающего флюида T_{fi} непосредственно связан с преобразованием в асинхронном двигателе электрической энергии в механическую, которое сопровождается потерями мощности ΔP_{Di} . Потери мощности ΔP_{Di} , выраженные через текущий момент на валу электродвигателя и КПД в зависимости от угловой скорости, определяются как [6]

$$\Delta P_{Di} = M_i \omega_i \left(\frac{1}{\eta_i} - 1 \right) = \frac{\sqrt{3} \left(U_n \sqrt{f_i^*} \right)^2 r_2' \frac{\omega_0 f^*}{\omega_0 f^* - \omega_i} \omega_i}{\omega_0 f_i^* \left[\left(r_1 + r_2' \frac{\omega_0 f^*}{\omega_0 f^* - \omega_i} \right)^2 + f_i^{*2} (x_1 + x_2')^2 \right]} \left(\frac{1}{\eta_i} - 1 \right), \quad (2)$$

где $f_i^* = \frac{f_i}{f}$ — относительная частота;

f — заданная частота питающего переменного тока;

f_i — изменяющаяся частота;

r_2' , x_2' — активное и индуктивное приведенные сопротивления ротора соответственно;

r_1 , x_1 — активное и индуктивное сопротивления статора соответственно;

ω_0 — синхронная угловая скорость;

ω_1 — рабочая угловая скорость;

U_n — номинальное напряжение электродвигателя;

$\eta_i = \frac{M_i \omega_i}{M_i \omega_i + P_{mech} + P_{lm} + P_{var}}$ — КПД электродвигателя;

P_{mech} — механические потери;

P_{lm} — потери мощности в меди статора;

P_{var} — переменные потери.

Угловая скорость ω_1 для i -го момента времени определяется по замеренному значению силы тока $I_{зам i}$ из уравнения

$$I_{зам i} = \sqrt{\left(I_\mu + I_{2i}' \cos(\alpha) \right)^2 + \left(I_{ha} + I_{2i}' \sin(\alpha_i) \right)^2}, \quad (3)$$

где

$$I_{2i}' = \frac{U_n}{\sqrt{\left(r_1 + r_2' \frac{f_i^* \omega_0}{f_i^* \omega_0 - \omega_i} \right)^2 + f_i^{*2} (x_1 + x_2')^2}} —$$

приведенный ток ротора;

$$\alpha_i = \arcsin \left(\frac{\sqrt{\frac{U_n^2}{(x_1 + x_2')^2 f_i^{*2}} - (I_{2i}')^2}}{\frac{U_n}{(x_1 + x_2') f_i^*}} \right);$$

I_{ha} — активная составляющая холостого тока;

I_μ — ток намагничивания.

Одним из параметров, определяющих температуру двигателя, является коэффициент теплоотдачи флюида α_{fi} . Если флюид, обтекающий ПЭД в затрубном пространстве скважины, представляет собой двухфазный поток, то возможны различные структуры течения

газожидкостной смеси [5]. Разница в структуре течения газожидкостной смеси оказывает влияние на механизм передачи тепла от стенки ПЭД. В случае пузырькового режима течения газожидкостной охлаждающей смеси коэффициент теплоотдачи можно записать как для квазиоднофазной жидкости в виде

$$\alpha_{fi} = \frac{N_{Um} \lambda_L}{D_c - D_D}, \quad (4)$$

где λ_L — коэффициент теплопроводности водонефтяной смеси;

N_{Um} — число Нуссельта.

Для пробкового режима течения коэффициент теплоотдачи охлаждающего флюида рассчитывается с учетом структуры газожидкостного течения, а именно с учетом длины жидкостной пробки и пленки, в виде

$$\alpha_{fi} = \frac{N_{US} \lambda_L}{D_c - D_D} \frac{L_{LS}}{L_{SU}} + \frac{N_{UTB} \lambda_L}{D_c - D_D} \left(1 - \frac{L_{LS}}{L_{SU}}\right), \quad (5)$$

где N_{US} — число Нуссельта для области жидкостной пробки;

N_{UTB} — число Нуссельта для области жидкостной пленки;

L_{LS} — длина жидкостной пробки;

L_{SU} — длина жидкостной пробки плюс пузырек Тейлора.

Для прогнозирования структуры течения и гидродинамических параметров газожидкостной смеси в кольцевом канале, образованном стенками эксплуатационной колонны и ПЭД, можно воспользоваться гидродинамической моделью *Caetano* [7].

Другим не менее важным параметром, определяющим температуру двигателя, является коэффициент теплоотдачи ПЭД α_{Di} . Если расчетная зависимость для теплоотдачи флюида α_{fi} имеет достаточное научное обоснование, то с оценкой коэффициента теплоотдачи ПЭД α_{Di} не все однозначно. Ниже приведена полученная авторами зависимость для расчета α_{Di} как функция от текущей силы тока I_i :

$$\alpha_{Di} = \frac{I_{зам.мест}^2}{\left(\frac{\Delta P_{Di}}{\pi D_D L_D (T_{Dзам.мест} - T_{fi})} - \frac{D_D}{D_c \alpha_{fi}} \right) I_i^2}, \quad (6)$$

где $I_{зам.мест}$ — значение тока, соответствующее замеренной температуре $T_{Dзам.мест}$;

I_i — значение тока, полученное в результате ежедневного мониторинга.

Тарировку выражения для расчета коэффициента теплоотдачи ПЭД α_{Di} необходимо осуществлять по одному замеренному значению температуры ПЭД $T_{Dзам.мест}$, соответствующему замеру силы тока $I_{зам.мест}$.

На примере вывода на режим одной из скважин Илишевского месторождения рассмотрим работоспособность предложенного алгоритма «виртуального датчика давления» для оценки температуры ПЭД. Для анализа работоспособности предложенного алгоритма была выбрана скважина, оснащенная датчиками ТМС, что позволяло осуществлять сопоставление расчетных и замеренных значений температуры электродвигателя. Расчеты по алгоритму осуществлялись в квазистационар-

Рисунок 1. Динамика параметров мониторинга, необходимых для расчета температуры ПЭД до остановки и после выхода скважины на режим

ной постановке. Для этого до и после остановки скважины (15 числа см. рисунок 1) ежедневно фиксировались значения давления, дебита жидкости и газа в области ПЭД, а также значения силы и частоты переменного тока на электродвигателе. Исходные данные для расчета по разработанному алгоритму сведены на рисунке 1. Дебит газа, а также плотности жидкости и газа рассчитывались по PVT-корреляциям для заданных значений дав-

лений и температуры в области ПЭД. Газовый фактор и обводненность скважинной продукции принимались в виде фиксированных значений ($\Gamma_{\phi} = 17,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $n = 0,927$).

На рисунке 2 приведены расчетные значения коэффициента теплоотдачи охлаждающего флюида α_{fl} и коэффициента теплоотдачи электродвигателя $\alpha_{\text{Дв}}$.

На рисунке 3 приведено сопоставление расчетной и замеренной температур ПЭД.

Рисунок 2. Динамика изменения расчетных значений коэффициентов теплоотдачи охлаждающего флюида и электродвигателя

Рисунок 3. Сопоставление расчетных и замеренных значений температур ПЭД в процессе освоения скважины

Выводы

1. Разработан алгоритм «виртуального датчика температуры», позволяющий путем интерпретации замеренных электрических параметров, давления и объемного расхода охлажда-

ющего флюида оценивать величину текущей температуры погружного электродвигателя для УЭЦН.

2. Получена корреляция для оценки коэффициента теплоотдачи ПЭД $\alpha_{\text{Дв}}$ в виде функции от

текущей силы тока I_i , коэффициента теплоотдачи охлаждающего флюида α_{fi} и потери мощности двигателя на тепловыделение ΔP_{Di} .

3. Верификация алгоритма «виртуального датчика температуры» показала, что расхож-

дение расчетных и замеренных значений температур ПЭД для рассматриваемой скважины Илишевского месторождения не превышает 3 %.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кутдусов А.Т. Совершенствование эксплуатации наклонных скважин с высокой пластовой температурой, оборудованных электроцентробежными насосами: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: БашНИПИнефть, 2002. 134 с.

2. ГОСТ 30195-94. Электродвигатели асинхронные погружные. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1996. 35 с.

3. Пашали А.А., Михайлов В.Г. Использование алгоритма «виртуального расходомера» при выводе нефтяных скважин на режим // Нефтяное хозяйство. 2020. № 10. С. 83–85. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-10-82–85.

4. Миронов Ю.С., Гафуров О.Г., Асылгареев А.Н., Репи Н.Н. О тепловом режиме работы погружного центробежного насоса // Вопросы интенсификации добычи нефти: сб. науч. тр. БашНИПИнефть. Уфа: БашНИПИнефть, 1990. Вып. 28. С. 203–208.

5. Волков М.Г. Методика расчёта течения нефтегазовых смесей в стволе вертикальной скважины // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Вып. 3 (109). С. 9–42.

6. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.

7. Caetano E.F. Upward Vertical Two-Phase Flow Through an Annulus: Ph. D. Sci. Diss. Tulsa: The University of Tulsa, 1986. 242 p.

Electric Centrifugal Pumps: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, BashNIPIneft' Publ., 2002. 134 p. [in Russian].

2. GOST 30195-94. *Elektrodvigateli asinkhronnye pogruzhnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standard 30195-94. Asynchronous Submersible Motors. General Specifications]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1996. 35 p. [in Russian].

3. Pashali A.A., Mikhailov V.G. Ispol'zovanie algoritma «virtual'nogo raskhodomera» pri vyvode neftnykh skvazhin na rezhim [Use of the «Virtual Flow Meter» Algorithm in Bringing the Oil Wells on to Stable Production]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 2020, No. 10, pp. 83–85. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-10-82–85. [in Russian].

4. Mironov Yu.S., Gafurov O.G., Asylgareev A.N., Repi N.N. O teplovom rezhime raboty pogruzhnogo tsentrobezhnogo nasosa [About the Thermal Mode of Operation of a Submersible Centrifugal Pump]. *Sbornik nauchnykh trudov BashNIPIneft' «Voprosy intensifikatsii dobychi nefi»* [Collection of Scientific Papers of BashNIPIneft «Issues of Intensification of Oil Production»]. Ufa, BashNIPIneft' Publ., 1990, Issue 28, pp. 203–208. [in Russian].

5. Volkov M.G. Metodika rascheta techeniya neftevodogazovykh smesei v stvole vertikal'noi skvazhiny [Oil-Water-Gas Flow Calculations in Vertical Wells]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov — Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2017, Issue 3 (109), pp. 9–42. [in Russian].

6. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Electric Drive Theory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 560 p. [in Russian].

7. Caetano E.F. *Upward Vertical Two-Phase Flow Through an Annulus: Ph. D. Sci. Diss.* Tulsa, The University of Tulsa, 1986. 242 p.

REFERENCES

1. Kutdusov A.T. *Sovershenstvovanie ekspluatatsii naklonnykh skvazhin s vysokoi plastovoi temperaturoi, oborudovannykh elektrotsentrobezhnyimi nasosami: dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the Operation of Deviated Wells with High Reservoir Temperature, Equipped with

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Волков Максим Григорьевич, канд. техн. наук, заместитель генерального директора по технологическому развитию и инновациям, ООО «РН-БашНИПИнефть», доцент кафедры «Цифровые технологии в разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений», Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

Maksim G. Volkov, Candidate of Engineering Sciences, Deputy General Director for Technological Development and Innovation, RN-BashNIPIneft LLC, Assistant Professor of Digital Technologies in Oil and Gas Fields Development and Operation Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

e-mail: VolkovMG@bnipi.rosneft.ru

Зейгман Юрий Вениаминович, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Разработка и эксплуатация нефтяных и газонефтяных месторождений», Уфимский государственный нефтяной технический университет, главный специалист аналитического отдела, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, Российская Федерация

Yuriy V. Zeygman, Doctor of Engineering Sciences, Head of Oil and Gas-Oil Fields Development and Operation Department, USPTU, Chief Specialist of the Analytical Department, RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russian Federation

e-mail: JVZeygman@yandex.ru