

Факторная модель динамики освоения эксплуатационного ресурса ЭЦН и схема ее идентификации по данным промыслового контроля

Д. А. Говорков¹, И. В. Константинов²

Тюменский индустриальный университет

¹dagovorkov@mail.ru, ²ivkonstantinov95@yandex.ru

И. Г. Соловьев

Тюменский научный центр СО РАН

igsolovyev123@gmail.com

Аннотация. Рассмотренная модель динамики освоения эксплуатационного ресурса электроцентробежного насоса (ЭЦН) имеет многофункциональное назначение в задачах контроля комфортных условий эксплуатации, оптимизации режима, регламента и параметров обустройства скважин при замене отказавшего оборудования. Прогноз динамики освоения ресурса по фонду скважин служит основой планирования объёма запасов и управления производственными процессами ремонтно-технического обслуживания. Факторный анализ в отличие от математического моделирования обобщает опыт эксплуатации таких систем, определяя факторные показатели ускоренного механического износа и старения изоляции. В работе обсуждаются подходы и алгоритмы идентификации коэффициентов чувствительности модели ресурса при кумулятивно накапливаемых факторах по данным контроля состояний работы погружного оборудования для группы скважин на полных жизненных циклах.

Ключевые слова: ресурс электро-центробежного насоса; модель; идентификация

I. ВВЕДЕНИЕ

Период наработки на отказ – T погружных ЭЦН – одна из главных характеристик в задачах планирования и управления процессами нефтедобычи. Подходы и методы обеспечения функциональной надежности на этапах конструирования и эксплуатации глубинно-насосного оборудования неодинаковы. Оценка законов распределения отказов и связанные с ними методы принятия решений на основе теории массового обслуживания отражают общие закономерности и осреднённые показатели надёжности управляемых процессов [1, 2]. Такие оценки могут оказаться слишком грубыми для оптимизации режимов и параметров обустройства каждой скважины в индивидуальности. Технологии контроля на основе современных средств устьевого и глубинной телеметрии позволяют индивидуально оценивать действия факторов ускоренного износа с прогнозом периода наработки [3, 4].

Цель настоящей работы – дать целостное описание модели освоения ресурса установки, с текущим контролем его остатка на основе выделения, формализации и

вычислительной реализации главных факторов ускоренного износа и старения, а также – разработка алгоритма параметрического оценивания модели ресурса по данным контроля режимных состояний для выделенных групп ЭЦН на полных жизненных циклах эксплуатации.

II. ФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ РЕСУРСА ПОГРУЖНОЙ УСТАНОВКИ

Основные этапы конструирования модели:

- определение ресурса ЭЦН и его потенциала в номинальных (комфортных) условиях эксплуатации;
- определение и формализация факторных функций ускоренного износа;
- приведение модели к линейно-регрессионному виду с неявной формой расчёта периода наработки на отказ.

Пусть потенциальный ресурс новой установки, обеспеченный заводом изготовителем, оценивается максимально достижимым уровнем реализуемой полезной работой центробежного насоса на полном жизненном цикле, т.е. максимальным количеством отданной энергии в комфортно-номинальных условиях эксплуатации силового блока

$$R^0 = \gamma_0 q^0 h^0 T^0. \quad (1)$$

Здесь: $\gamma_0 q^0 h^0 = N_2^0$ – полезная работа насоса типоразмера $\langle q^0, h^0 \rangle$ с номинальной производительности $q_N = q^0$ и напором $h_N = h^0$ при перекачке воды с удельным весом γ_0 , а T^0 – потенциал наработки, закладываемый производителем оборудования.

Определение набора главных факторов ускоренного износа и риска отказа производилось с учетом опыта обустройства и эксплуатации скважин силовыми установками, работающими в разных режимных состояниях в разных термобарических условиях скважин [5].

Фактор упруго-пластических изгибов жёсткой удлинённой конструкции «ЦН-ПЭД» и трения при её погружении в искривлённый наклонно направленный ствол скважины

$$\delta N_1(\omega_N(t), H_N) = \omega_N(t) \sum_l \left[\alpha_{1l} \left(\frac{H_N}{H_R} - \delta H_l \right)_+ + \alpha_{2l} 1 \left(\frac{H_N}{H_R} - \delta H_l \right)_+ \right]$$

Здесь $\omega_N(t) = (1-s(t))\omega(t)$ – относительная скорость вращения вала двигателя со скольжением – $s(t)$ и относительной частотой питающего напряжения – $\omega(t)$,

$\delta H_l = \frac{H_l}{H_R}$ – относительные отметки уровней погружения

с соответствующими средними показателями α_{1l} набора угла кривизны ствола скважины, α_{2l} – значимый уровень приращения угла кривизны (если таковой имеются) в интервале (H_i, H_{i+1}) .

Фактор отклонений от номинального режима подачи

$$\delta N_2(q_N(t)) = \left(\left| \frac{q_N(t)}{q^0} - 1 \right| - \delta q \right)_+$$

с симметричной зоной нечувствительности $[-\delta q, \delta q]$.

Фактор уровня перегрева изоляции ПЭД и плоского кабеля

$$\delta N_3(\theta_s(t)) = \frac{1}{\theta_{s3}} \left((\theta_s(t) - \theta_{s1})_+ + \alpha_0 (\theta_s(t) - \theta_{s2})_+ \right),$$

где $\theta_s(t)$ – взвешенная сумма температур нагрева кабеля и ПЭД, θ_{s*} – настроечные параметры.

Фактор контроля перегрузки по полезным мощностям для ПЭД и ЦН

$$\delta N_4(P_2(t), N_2(t)) = \left(\frac{P_2(t)}{P_2^0} - 1 \right)_+ + \left(\frac{N_2(t)}{N_2^0} - 1 \right)_+,$$

где $P_2(t)$ – мощность на валу двигателя, $N_2(t)$ – полезная работа на выходе насоса, P_2^0 и N_2^0 – их номинальные значения по шкале выбранных типоразмеров.

Фактор риска пробоя изоляции вследствие перенапряжения, обусловленного законом линейной вариации напряжения: $U_1(t) = \omega(t)U_1^0$ в технологиях частотного регулирования подачи

$$\delta N_5(U_1(t)) = \left(\frac{U_1(t)}{U_+^0} - 1 \right)_+ + \alpha_U \left(\frac{U_1(t)}{U_+^0} - \delta U \right)_+, \quad \delta U > 1,$$

где U_+^0 – контрольный уровень перенапряжения для выбранного типоразмера ПЭД с номинальным значением – U_1^0 .

В условиях (1), искомое представление модели динамики освоения эксплуатационного ресурса ЭЦН вводится в регрессионной форме равенством

$$R(t) = \int_0^t \left[\gamma(t)q_N(t)h_N(t) + \gamma_0 q^0 h^0 (a_{N1} \delta N_1(\omega_N(t), H_N) + \dots + a_{N2} \delta N_2(q_N(t)) + a_{N3} \delta N_3(\theta_s(t)) + \dots + a_{N4} \delta N_4(P_2(t), N_2(t)) + a_{N5} \delta N_5(U_1(t))) \right] dt \quad (2)$$

где первое подынтегральное слагаемое – производственные затраты ресурса, исчисляемые в работе насоса $N_2(t) = \gamma(t)q_N(t)h_N(t)$ с производительностью $q_N(t)$ и напором $h_N(t)$ по перекачке жидкости с удельным весом $\gamma(t)$. Последующие слагаемые интегральной суммы – непроизводственные затраты ресурса, отражающие действие факторов ускоренного износа на ЦН и ПЭД в долях от нормативного уровня полезной работы выбранного типоразмера: $N_2^0 = \gamma_0 q^0 h^0$.

При непрерывном контроле и прогнозировании факторных функций ускоренного износа – $\delta N_1(t) = \delta N_1(\omega_N(t), H_N)$, ..., $\delta N_5(t) = \delta N_5(U_1(t))$, оценка времени наработки на отказ в неявном виде осуществляется по условию

$$T = \arg \left\{ R^0 = R(t) \right\},$$

что, согласно (1) и (2), соответствует выражениям

$$T = \arg \left\{ T^0 = \int_0^t (\Delta N(t) + \mathbf{a}_N^T \delta \mathbf{N}(t)) dt \right\}$$

$$\text{или } T = \arg \left\{ T^0 = \Delta E(t) + \mathbf{a}_N^T \delta \mathbf{E}(t) \right\}, \quad (3)$$

где $\Delta E(t) = \int_0^t \Delta N(t) dt$, $\Delta N(t) = \frac{\gamma(t)q_N(t)h_N(t)}{\gamma_0 q^0 h^0}$ – есть

отношение реально производимой работы к расчётно-номинальной, а векторы параметров и регрессоров определяются следующим образом

$$\mathbf{a}_N = [a_{N1} \dots a_{N5}]^T,$$

$$\delta \mathbf{E}(t) = [\delta E_1(t) \dots \delta E_5(t)]^T = \left[\int_0^t \delta N_1(t) dt \dots \int_0^t \delta N_5(t) dt \right]^T \quad (4)$$

Оценка времени наработки для стационарных условий эксплуатации, когда выполнено: $\Delta E(T) = T \cdot \Delta N$,

$\delta E_1(T) = T \cdot \delta N_1$, ..., $\delta E_5(T) = T \cdot \delta N_5$, необходимая для первичной оптимизации режима и параметров обустройства скважины ЭЦН [5], рассчитывается явным образом:

$$T = T^0 / (\Delta N + \mathbf{a}_N^T \delta \mathbf{N}). \quad (5)$$

III. СХЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ РЕСУРСА

Выделим основные особенности представленной факторной модели ресурса погружной установки с точки зрения обратной задачи:

- оценка факторов и периода наработки T для статических режимов работы производится по фактам контролируемых событий и известным

расчетным выражениям с использованием набора переменных $\gamma, h_N, \omega_N, q_N, P_2, N_2, U_1, \theta_B(t), \theta_p(t)$. Указанные состояния могут быть считаны по регламентированным отчетным документам («шахматка», МЭР) режима эксплуатации;

- потенциал наработки на отказ – T^0 закладывается конструкторскими решениями, используемыми материалами, технологиями, культурой изготовления и различен для изделий разных производителей и разных типоразмеров. Поэтому в данной постановке параметр T^0 для однотипных изделий рассматривается как идентифицируемый, совместно с параметрами чувствительности – a_N к факторам износа;
- линейно-регрессионный вид модели (5) позволяет использовать стандартную схему идентификации по методу наименьших квадратов (МНК) [6];
- наличие наборов данных $T(k), \Delta N(k)$ и $\delta N(k)$ для множества однотипных установок с номерами $k \in K$ позволяет сформулировать правило идентификации модели ресурса (4) в следующем виде.

Утверждение. Пусть для множества $k \in K$ скважин с однотипными ЭЦН сформированы данные, соответствующие значениям вектора регрессоров – $\mathbf{v}(k) = [1/T(k) \quad -\delta N(k)^T]^T$ модели ресурса (5) на полном жизненном цикле – $T(k)$ работы насоса.

Тогда, типовая процедура расчёта оценок $\hat{\mathbf{a}} = [\hat{T}_0 \quad \hat{\mathbf{a}}_N]$ параметров модели ресурса по МНК сводится к решению системы уравнений

$$F\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{b}, \quad (6)$$

где $F = \sum_{k \in K} \mu(k) \cdot \mathbf{v}(k) \cdot \mathbf{v}(k)^T$, $\mathbf{b} = \sum_{k \in K} \mu(k) \cdot \Delta E(k) \cdot \mathbf{v}(k)$, а $\mu(k) \in [0; 1]$ – весовые коэффициенты значимости и меры соответствия данных по k -ой скважине.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты решения задачи идентификации для группы скважин из фонда постоянной добычи, обустроенных ЭЦН с близкими номинальными характеристиками по производительности, напору, одной габаритной группы (группа 5), с радиальным типом ступени и близкими номиналами мощностей ПЭД [7] представлены ниже.

В табл. 1 приводятся данные стационарных режимов работы, восстановленные факторные показатели износа и полученные периоды наработки по тестовой группе из 33 скважин (в таблице указаны данные для 6 из них). Данные по инклинометрии представлены типовыми зависимостями накопленного угла искривления от длины конструкции и здесь не указываются.

ТАБЛИЦА I ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, РЕЖИМНЫЕ СОСТОЯНИЯ И ЗНАЧЕНИЯ ФАКТОРНЫХ ФУНКЦИЙ ГРУППЫ СКВАЖИН

k	H_N	H_R	p_R	β	Θ_R	q	ω_N	Θ_S	P_2	N_2	T	δN_1	δN_2	δN_3	δN_4	δN_5
	м	м	МПа	ед.	°С	м ³ /сут	ед.	°С	кВт	кВт	сут	ед.	ед.	ед.	ед.	ед.
1	2590	2744	20,9	0,82	78	42	0,94	114	2100	1235	341	0,12	0,26	0,12	0,26	0,05
2	2592	2800	20,2	0,72	80	56	1,04	118	2571	1880	217	0,21	0,37	0,92	0,31	0,22
3	2539	2707	17,9	0,98	83	49	0,91	114	1985	1282	385	0,15	0,15	0,40	0,19	0,04
4	2624	2655	18,1	0,96	78	69	1,05	118	3331	1954	251	0,17	0,21	0,62	0,41	0,1
5	2590	2727	21,9	0,95	81	42	0,96	113	2190	1780	316	0,12	0,26	0,12	0,26	0,05
...																
33	2976	3117	13,2	0,75	90	37	1,07	130	2721	2286	142	0,12	0,5	0,15	1,42	0,22

Результаты идентификации, представленные в табл. 2, свидетельствуют о стабильности оценок $\hat{\mathbf{a}} = [\hat{T}_0 \quad \hat{\mathbf{a}}_N]$ параметров модели ресурса. Среднее отклонение измеренных значений периода наработки на отказ $T(k)$ от оценок периода $\hat{T}(k)$, восстановленных по параметрам в результате идентификации, не превышает 7 %.

ТАБЛИЦА II РЕЗУЛЬТАТЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ РЕСУРСА

a_{N1}	a_{N1}	a_{N1}	a_{N1}	a_{N1}	T_0
ед.	ед.	ед.	ед.	ед.	сут.
0,28	0,38	0,31	0,19	0,1	424

На основе представленной модели ресурса и алгоритма ее идентификации можно сформировать расчетную схему оперативного прогноза времени наработки на отказ погружной установки по данным режимных измерений в реальном времени (рис. 1).



Рис. 1. Функциональная схема оперативного прогноза времени наработки на отказ ЭЦН

В заключение можно добавить, что создание и цифровая реализация факторных моделей освоения ресурса в режиме реального времени может быть использовано в решении следующих задач:

- контроля и управления эксплуатационным ресурсом фонда скважин, обустроенных ЭЦН, с

прогнозами периодов наработки на отказ в реальных производственных условиях;

- оптимизация режимов, регламентов и параметров обустройства скважин при замене ЭЦН после отказа;
- системы сопровождения и планирования графиков ремонтно-технических работ по замене погружного оборудования;
- системы планирования и управления запасами комплектующих ЭЦН нужных типоразмеров;
- в специальных задачах частотного регулирования подачи с прогнозом эффективности принимаемых решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Ивановский В.Н., Деговцов А.В., Сабиров А.А., Кривенков С.В. Влияние на наработку установок электроприводных центробежных насосов подачи и частоты вращения насоса при эксплуатации скважин, осложненных выносом механических примесей // Территория Нефтегаз. 2017. № 9. С. 58-64.

[2] Khabibullin R.A., Shabonas A.R., Gurbatov N.S., Timonov A.V. Prediction of ESPs Failure Using ML at Western Siberia Oilfields with Large Number of Wells // SPE Russian Petroleum Technology Conference. 2020. doi.org/10.2118/201881-MS

[3] Heninger M., Grande S.F, Shipp D.D. Identifying and Preventing ESP Failures Resulting from Variable Speed Drive Induced Power Quality Issues // SPE Gulf Coast Section Electric Submersible Pumps Symposium. 2019. doi.org/10.2118/194392-MS

[4] Noui-Mehidi, M.N., Bukhamseen. A.Y. Advanced Signal Analysis of an Electrical-Submersible-Pump Failure Owing to Scaling // SPE Prod & Oper 34 (2019), pp. 394–399. doi.org/10.2118/164320-PA

[5] Соловьев И.Г., Константинов И.В., Говорков Д.А. Оптимизация параметров обустройства и режима эксплуатации скважины с ЭЦН в условиях осложнений // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2019. № 9 (554). С. 28-35. doi.org/10.33285/0132-2222-2019-9(554)-28-35

[6] Пао С.Р. Линейные статистические методы и их применения. 1986. М.: Наука. 548 с.

[7] Методика подбора установок погружных центробежных насосов к нефтяным скважинам. URL: <http://autotechnologist.com/menu-styles/metodiki> (дата обращения 11.03.2021).