

А. Г. Кожин, А. Л. Портнягин

## АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОНАСОСОВ

*Рассмотрены методы идентификации модели остаточного ресурса установки электроцентробежного насоса, учитывающей пуско-остановочные режимы работы оборудования.*

На сегодняшний день добыча нефти в России представляет одну из самых важных отраслей производства. Широкое применение компьютерной техники, совершенствование методов контроля над техническими процессами приводит к накоплению большого объема информации, которую необходимо использовать для принятия производственных решений.

На работу УЭЦН влияет очень много факторов разного рода — от конструктивных характеристик установки до процессов, происходящих в пласте. Совокупность этих факторов обуславливает неодинаковые сроки жизни оборудования, в связи с чем становится актуальным вопрос создания и идентификации модели остаточного ресурса. Данная модель позволит проводить динамический анализ состояния фонда скважин и существенно повысить эффективность управления ремонтно-техническим обслуживанием электромеханического оборудования промыслов. При рациональной организации ремонтно-технического обслуживания потери от простоя можно свести к минимуму.

Обычно под техническим ресурсом понимается наработка оборудования от начала эксплуатации до выхода его из строя. В данной работе под ресурсом будем понимать некоторую переменную  $r(t)$ , характеризующую наработку на отказ, причем состояние неизрасходованного ресурса характеризует значение  $r(0) = 0$ , а полная остановка оборудования из-за износа соответствует  $r(T) = 1$ .

Эксплуатационная модель ресурса отражает влияние доминирующих факторов эксплуатации и может быть представлена в виде линейной зависимости, которая скомбинирована из трех групп факторов. В первую группу входят факторы, не зависящие от времени работы УЭЦН и уменьшающие ее ресурс на этапе ввода в эксплуатацию (так, большая кривизна ствола изначально уменьшает срок жизни установки за счет «проталкивания» ее на необходимую глубину). Такие факторы входят в модель ресурса как постоянный коэффициент. Следующая группа факторов — влияющие на расходование ресурса, но не изменяющиеся во времени. В третью группу входят факторы, которые изменяются со временем, и их необходимо измерять на всем протяжении работы УЭЦН.

Согласно проведенному анализу [1] выделим следующие доминирующие факторы и единицы их измерения:

$\beta_{\text{мех}}$  — содержание механических примесей (т. е. показатель устойчивости коллектора), кг/л;

$\beta_{\text{соль}}$  — содержание сопутствующих солей, кг/л;

$\mu_{\text{н}}$  — вязкость нефти (относительно воды), мПа\*с;

$\Gamma$  — газовый фактор, м<sup>3</sup>/ м<sup>3</sup>.

$h_{\text{н}}$  — глубина подвески, м;

$q_{ж}(t)$  — объемный расход, м<sup>3</sup>/с;

$\beta_{в}$  — обводненность, %;

$n_{аз}$  — число азимутальных поворотов ствола скважины до  $h_n(m, j)$ , шт.;

$\beta_{г}$  — газовый фактор у приема насоса, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,

$\nu$  — вязкость газожидкостной смеси, МПа\*с;

$P(t)$  — давление у приемной сетки насоса, МПа;

$\dot{P}(t)$  — динамика изменения давления у приемной сетки насоса, МПа/с;

$I(t)$  — ток, потребляемый электродвигателем, А;

$N_1(t)$  — потребляемая мощность, Вт;

$\Delta U(t)$  — перекося фаз питающего напряжения, %.

Исходя из вышеперечисленного, можно представить, что модель ресурса будет выглядеть следующим образом:

$$r(t) = R(\beta_{мех}, \beta_{соль}, \mu_n, \Gamma, h_n, q_{ж}, \beta_{в}, n_{аз}, \beta_{г}, \nu, P, \dot{P}, \omega I, n_{пуск}, I, N_1, \Delta U).$$

Простой анализ производственных ситуаций свидетельствует, что срок работы УЭЦН при прочих равных условиях зависит также от завода-изготовителя и типоразмера УЭЦН. Поэтому имеет смысл разбить погружные установки на группы и далее рассматривать модель остаточного ресурса для конкретной группы изделий.

При анализе [3] ресурса УЭЦН выделим два функциональных блока:

- ресурс изоляции системы «кабель — ПЭД» (питающий кабель, штепсельная муфта и статорная обмотка погружного электродвигателя (ПЭД))  $r_1(t)$ ;
- механический ресурс насоса и двигателя  $r_2(t)$ .

Таким образом, ресурс УЭЦН имеет две составляющие:

$$r(t) = [r_1(t), r_2(t)]^T. \quad (1)$$

Под выходом из строя механической части УЭЦН  $r_2(T) = 1$  будем подразумевать заклинивание валов насоса или электродвигателя, сильное снижение подачи из-за сильного износа рабочих лопаток и другое.

Выходом из строя ресурса изоляции системы «кабель — ПЭД»  $r_1(T) = 1$  будем считать электропробой кабеля или обмоток двигателя, а также недопустимое снижение изоляции кабеля.

Сделаем допущение, что при достижении любым ресурсом значения  $r_i(t) = 1$  происходит выход оборудования из строя.

Будем предполагать, что ресурс изоляции и механический ресурс взаимно не обусловлены.

Таким образом, эти ресурсы будут вычисляться параллельно и по одному принципу, поэтому будем рассматривать идентификации неизвестных коэффициентов только для одного из них, для второго алгоритм полностью идентичен.

Далее в работе индекс модели  $r(t)$  будет опущен.

При моделировании динамики освоения ресурса системы для оценки срока наработки до отказа особое значение имеет величина начального ресурса  $r(0)$ . Каждую скважину будем рассматривать относительно времени ее первого пуска, т. е. для всех скважин в начале их эксплуатации  $r(0) = 0$ .

В непрерывном режиме эксплуатации координаты вектора  $r(t)$  возрастают непрерывно, но на пусках освоение оставшегося ресурса происходит скачком (вследствие пиковых механических напряжений и больших температурных градиентов), причем по мере роста координат  $r(t)$  опасность отказа при оче-

редном пуске увеличивается. Учитывая это обстоятельство, введем линейное рекуррентное соотношение, отражающее пусковые условия:

$$r(t_+) = \alpha r(t), \quad (2)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, учитывающий условие  $n$ -го пуска ( $\alpha > 1$ );

$r(t_+)$ ,  $r(t)$  — освоенная к моменту времени  $t$  часть ресурса после и до пуска соответственно.

Коэффициент  $\alpha$  — общий для каждой из скважин, представленных в конкретной группе.

Все вышеперечисленные факторы необходимо привести в форму отклонений от номинальных значений:

$$X_i = \frac{(\Phi_i - \Phi_{Hi}^0)_+}{\Phi_{Hi}^0}, \quad (3)$$

где  $\Phi_i$  — один из факторов, влияющий на износ оборудования;

$\Phi_{Hi}^0$  — среднее или характерное значение этого фактора.

Будем считать, что значение действующего фактора меньше его характерного значения не увеличивает срок жизни оборудования. Из-за этого условия в выражении нахождения вектора  $X(t)$  числитель берется только из положительной области. При  $(\Phi_i - \Phi_{Hi}^0) < 0 \rightarrow X_i = 0$ .

Составим вектор параметров  $X(t)$ :

$$X(t) = [X_b, X_{\beta_{\text{мех}}}, X_{\beta_{\text{соль}}}, X_{\mu_n}, X_{\Gamma}, X_{h_n}, X_{q_{\text{ж}}}, X_{\beta_v}, X_{n_{\text{аз}}}, X_{\beta_{\Gamma}}, X_v, X_P, X_{\dot{P}}, X_{\omega l}, X_{n_{\text{пуск}}}, X_L, X_{Nl}, X_{\Delta U}].$$

При пуско-остановочном режиме эксплуатации УЭЦН при выключении установки ее не достают на поверхность (ввиду очень большой стоимости операции по подъему-спуску), поэтому в выключенном состоянии УЭЦН также происходит ее старение и, следовательно, израсходование ресурса. Таким образом, наблюдение за установкой и сбор данных необходимо вести на протяжении всего времени от спуска оборудования до его выхода из строя.

Исходя из всего вышеперечисленного, составим модель остаточного ресурса [2] для произвольного времени  $t$ :

$$r_j(t) = \alpha r_{j-1}(t_j) + \int_{t_j}^t c^T X(t) dt, \quad (4)$$

где  $r_j(t)$  — остаточный ресурс  $j$ -го пуска;

$t_j$  — время  $j$ -го пуска;

$c$  — коэффициенты при факторах, отражающие их влияние на износ оборудования. Коэффициенты  $c$  — общие для каждой из скважин, представленных в конкретной группе.

Примем, что:

$$V(k) = \int_{t_j}^{t_{j+1}} X(t) dt, \quad r(k) = r_j(t_{j+1}). \quad (5)$$

Тогда модель остаточного ресурса примет вид

$$r(j+1) = \alpha r(j) + c^T V(j+1). \quad (6)$$



$$F = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n Z_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n Z_{i1}Z_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n Z_{i1}Z_{im} \\ \sum_{i=1}^n Z_{i2}Z_{i1} & \sum_{i=1}^n Z_{i2}^2 & \dots & \sum_{i=1}^n Z_{i2}Z_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^n Z_{im}Z_{i1} & \sum_{i=1}^n Z_{im}Z_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n Z_{im}^2 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n Z_{i1} \cdot 1 \\ \sum_{i=1}^n Z_{i2} \cdot 1 \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n Z_{im} \cdot 1 \end{pmatrix},$$

$m$  — количество действующих факторов.

4. Находим коэффициенты  $\bar{C}$  из полученной системы уравнений:

$$\bar{c} = F^{-1}b. \quad (13)$$

5. Делаем проверку правильности вычисления. Для этого подставляем в

исходную модель (9) для каждой скважины полученные коэффициенты  $\bar{C}$ , вследствие чего приходим к уравнениям относительно  $\alpha$ :

$$\begin{cases} \alpha \overset{\wedge}{d}_{11} + \alpha \overset{\wedge}{d}_{12} \dots + d_{1k} = 1, \\ \alpha \overset{\wedge}{d}_{21} + \alpha \overset{\wedge}{d}_{22} \dots + d_{2k} = 1, \\ \dots \\ \alpha \overset{\wedge}{d}_{n1} + \alpha \overset{\wedge}{d}_{n2} \dots + d_{nk} = 1, \end{cases} \quad (14)$$

где коэффициенты  $d_{ij}$  представляют собой числа  $d_{ij} = c^T V_i(j)$ .

6. Просуммируем все уравнения и получим одно алгебраическое уравнение относительно  $\alpha$ :

$$\alpha \overset{\wedge}{(d}_{11} + d_{21} + \dots + d_{n1}) + \alpha \overset{\wedge}{(d}_{12} + d_{22} + \dots + d_{n2})} \dots + d_{1k} + d_{2k} + \dots + d_{nk} - 1 = 0. \quad (15)$$

7. По этому уравнению находим его корни. Из этих корней выбираем один, который бы удовлетворял условиям:  $\alpha$  — не комплексное, положительное, вещественное число, лежащее в пределах от 1 до априорно заданного значения  $\bar{\alpha} = 1,25$ .

Численный эксперимент проводился на примере работы 20 скважин с разными условиями эксплуатации и сроками наработки на отказ. Базовая модель ресурса в условиях действия пяти факторов имеет вид  $r(t) = R(t, q_{ж}, h_{н}, P, \Gamma, \beta_{в})$ , где параметры  $c = [0,002; 0,0001; 0,00015; 0,0003; 0,00005; 0,007]$  и  $\alpha = 1,05$ . Исходные данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

## Исходные данные численного эксперимента

№	Z <sub>0</sub>	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	T
1	80,9	121,195	856,0361	1340,047	11,27902	42,94526	1	59	—	78
2	52	111,6445	1928,103	731,4519	8,610416	54,3911	1	—	—	52
3	96,35	155,2965	2054,107	474,3454	13,6499	49,28692	1	48	—	94
4	120,9175	60,46532	1202,277	423,2009	19,36353	64,15201	1	47	101	113
5	36	159,4014	909,9902	1854,644	7,866048	32,84518	1	—	—	36
6	102,75	98,1703	109,5729	98,67173	106,0058	104,9675	1	76	—	99
7	91,5	175,2366	184,3429	486,6772	742,41	84,34601	1	51	—	89
8	145,8875	148,4229	146,8543	382,0523	139,5881	79,22404	1	75	101	137
9	41	86,41852	379,0682	254,7296	237,3508	111,5464	1	—	—	41
10	94,35	353,7167	1035,585	339,9176	19,86753	74,14275	1	48	—	92
11	75,35	36,94287	202,625	65,32336	37,36088	114,5989	1	48	—	73
12	27	66,93462	688,2475	1324,032	5,387438	66,32886	1	—	—	27
13	103,35	98,82494	97,92061	102,3887	99,54153	105,549	1	48	—	101
14	44	127,0855	619,0329	240,453	2,120332	107,3237	1	—	—	44
15	100,35	328,2272	494,6837	1079,026	5,084836	52,96614	1	48	—	98
16	93,75	211,5569	139,9256	447,9045	23,67775	91,07286	1	76	—	90
17	122,575	122,7495	581,202	656,0547	651,5318	61,43426	1	50	101	115
18	45	702,2879	87,14548	226,3118	432,8294	107,9489	1	—	—	45
19	63,5	132,4466	327,487	157,7802	640,2157	104,8435	1	51	—	61
20	86,75	184,2215	168,023	456,1077	658,2772	87,95608	1	76	—	83

По данным счета при задании  $\alpha = 1,1$  были получены следующие результаты:  $c = [0,0014846; 0,00013045; 0,00015382; 0,00030253; 0,00003296; 0,0071234]$ . Так, если коэффициент  $\alpha$  был принят ошибочным, то и коэффициенты  $c$  также были посчитаны не точно. Однако чувствительность результатов оценки времени наработки на отказ по результатом приближенной идентификации для априорно заданной  $\alpha$  в пределах от 1,025 до 1,2 вкладывается в 1,5 % погрешности счета времени на отказ, что подтверждается результатами численного счета.

Подсчитаем время выхода из строя оборудования для пяти первых скважин, используя коэффициенты  $\alpha$  и  $c$ , полученные в результате численного эксперимента. Реальные и вычисленные времена наработки на отказ оборудования представлены в табл. 2. Далее находим среднее отклонение реального значения времени выхода из строя с полученным.

$$\Delta T = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 |T_i - \hat{T}_i|. \quad (16)$$

Среднее отклонение приведем в относительный вид, поделив на принятое среднее время наработки на отказ данных УЭЦН.

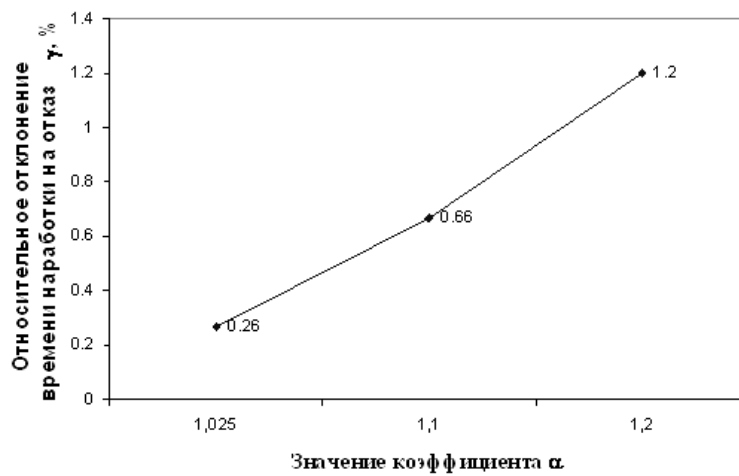
$$\gamma = \frac{\Delta T}{T_{cp}} = \frac{\Delta T}{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 T_i}. \quad (17)$$

Зависимость относительной величины изменения времени наработки на отказ от величины выбранного на первом шаге вычисления коэффициента  $\alpha$  приведена на рис. 1.

Таблица 2

## Реальные и вычисленные времена наработки на отказ

	$T_1$ , сут	$T_2$ , сут	$T_3$ , сут	$T_4$ , сут	$T_5$ , сут
	78	52	94	113	92
$\hat{\alpha}$	$\hat{T}_1$ , сут	$\hat{T}_2$ , сут	$\hat{T}_3$ , сут	$\hat{T}_4$ , сут	$\hat{T}_5$ , сут
1,025	78	51	94	114	92
1,1	79	53	95	111	92
1,2	76	54	96	110	92

Рис. 1. Зависимость относительной величины изменения времени наработки на отказ от коэффициента  $\alpha$ 

Для процесса идентификации модели остаточного ресурса интересен также вопрос влияния погрешности измерения действующих факторов на нахождение коэффициентов модели. Для этого в выборке данных к значениям действующих факторов будем добавлять произвольную погрешность  $\xi$

$$\tilde{V}(j) = V(j) + \xi \quad (18)$$

в процентном отношении от его среднего значения, а время выхода из строя — фиксировать исходя из реальных значений факторов.

С помощью этой выборки данных были найдены вектора  $c$  при разных значениях погрешности измерения (табл. 3).

Таблица 3

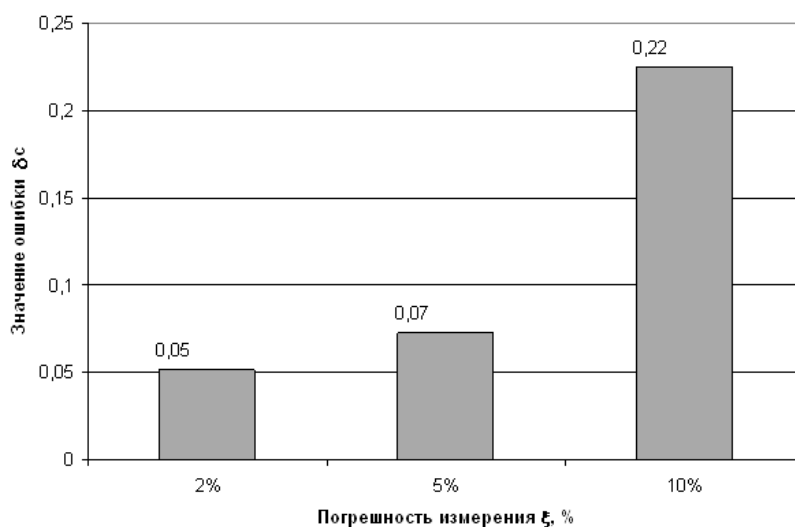
## Значения коэффициентов при погрешности измерений

$\xi$ , %	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$
2	0,001689	0,000103	0,00015	0,0003	6,32E-05	0,007022
5	0,0012151	0,00010932	0,00015701	0,00029832	4,23E-05	0,0070255
10	0,000678	8,84E-05	0,00013	0,000309	0,000108	0,006972

По данным счета определим значения ошибки вычислений для вектора параметров  $c$ :

$$\delta_c = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{j=1}^n \left( \frac{c_j - c_j(i)}{c_j} \right)^2}. \quad (19)$$

Значения ошибки вычисления для вектора  $c$  проиллюстрированы на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость значения ошибки  $\delta_c$  от погрешности измерений  $\xi$

Сформулированные подходы и математические схемы показывают, как по анализу данных работы погружного оборудования множества скважин в период от начала эксплуатации до выхода из строя можно восстановить оценки модели остаточного ресурса, позволяющие вычислять сроки наработки на отказ, зависящие от конструктивных особенностей скважины и реально действующих факторов эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кожин А. Г., Соловьев И. Г. Анализ факторов, влияющих на износ погружного электрооборудования // Вестн. кибернетики. — Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2006. — № 5. — С. 3–9.
2. Кожин А. Г., Портнягин А. Л. Модель остаточного ресурса УЭЦН и вопросы ее идентификации // Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании: Материалы междунар. науч.-техн. конф. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2006.
3. Портнягин А. Л. Методы оценки остаточного ресурса УЭЦН, учитывающие режим работы установки // Нефть: Наука, экология и экономика: Материалы межвуз. студен. науч. конф. — Альметьевск, 2001.
4. Портнягин А. Л., Соловьев И. Г. Модель оценки остаточного ресурса погружного оборудования // Вестн. кибернетики. — Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2002. — Вып. 1. — С. 103–108.
5. Филиппов В. Н. Надежность установок погружных центробежных насосов для добычи нефти. — М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1983. — 50 с.



A. G. Kozhin, A. L. Portnyagin

*IDENTIFICATION ALGORITHM REGARDING OPERATIONAL LIFE MODEL  
FOR ELECTRICAL CENTRIFUGAL PUMPS*

*The article considers identification methods regarding remaining life model for centrifugal pumping unit, allowing for start-up and shut-down practices in equipment performance.*