

Тр. амер. о-ва инженеров-механиков / Энергет. машины и установки. 1977. № 4.

2. Кантуэлл Б. Дж. Организованные движения в турбулентных потоках // Волны и вихри: Сб. ст.: Пер. с англ. М., 1984.

3. Навознов О. Л., Савельев А. А. Влияние начальных условий на течение осесимметричных спутных струй // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1980. № 4.

Г. Н. Мигачева, М. Ю. Большакова

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИРАБОТКИ НА УРОВЕНЬ НАДЕЖНОСТИ БУРОВЫХ НАСОСОВ

Основной составляющей бурового оборудования являются буровые насосы, к которым предъявляются высокие требования в отношении надежности. В практике их эксплуатации часто наблюдаются аварийные ситуации, вызванные как износом основных деталей и узлов, так и внезапными отказами всего оборудования в целом. Одним из методов повышения надежности насосов является их доводка при приработке, а также введение новых технологий при изготовлении основных деталей [1; 2].

Технологическая приработка – это заключительный этап процесса изготовления изделия, представляющий собой относительно непродолжительную его работу в условиях, близких к эксплуатации, с целью обнаружения и устранения скрытых дефектов. Продолжительность приработки зависит как от количества и качества элементов, из которых состоит изделие, так и от стабильности технологических процессов их изготовления. Период приработки принято считать закончившимся, когда уменьшение параметра потока отказов для соответствующего диагностического критерия практически прекращается [3].

Качество сборки серийно выпускаемого ОАО «Уралмаш» бурового насоса УНБ-600 определяется по результатам технологической обкатки в течение двух часов под расчетной нагрузкой на специальных стендах. После обкатки проводится осмотр через крышку механической части насоса: зубьев шестерни и колеса с целью определения размеров пятна контакта.

Геометрические параметры зацепления: нормальный модуль 12 мм; числа зубьев шестерни и колеса 25 и 123 (передаточное число 4,9); угол

наклона зубьев $9^{\circ}22''$; ширина зубьев колеса 360 мм. При передаче расчетной нагрузки зацеплением контактные напряжения равны 42 кг/м^2 ; скорость качения в зацеплении 5,2 м/с; максимальные скорости скольжения: на головке зуба 0,42 м/с; на ножке зуба 0,51 м/с.

Обычно при обкатке применяют трансмиссионное масло, при этом шероховатость поверхностей зубьев и фактическая площадь пятна контакта часто не соответствуют требованиям сборочного чертежа. Нами проведена обкатка с добавкой в масло металлоплакирующей присадки МКФ-18У с целью проверки ее эффективности при технологической приработке изделия.

В ходе испытания по оценке эффективности процесса приработки для данного изделия контролировались следующие параметры:

- величина пятна контакта до и после приработки (определяется компаратором – сравнивающим устройством);
- шероховатость контактной поверхности зубьев до и после приработки (прибор «Диавит» МТ-30 фирмы «ММАГ», база измерений – 2 мм;
- наличие задиров на контактных поверхностях и направляющих ползунуов определяется при визуальном осмотре;
- сила тока статора электродвигателя привода стенда (обобщенный диагностический параметр).

Процесс приработки является случайным процессом, поскольку точное предсказание его протекания в каждом отдельном случае оказывается невозможным [4]. Регистрируя силу тока, потребляемого электродвигателем бурового насоса, мы получаем на диаграмме регистрирующего прибора кривую, определяемую случайным характером изменения крутящего момента и мощности двигателя. Описание таких процессов основывается на теории вероятностей и теории случайных функций, где применяют определенные вероятностные характеристики возможных реализаций регистрируемого диагностического параметра. Реализацией случайного процесса является выборочная функциональная зависимость между информативным параметром сигнала и измеряемой величиной. Такими характеристиками могут быть закон распределения или его числовые характеристики (математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение) и автокорреляционная функция или спектральная плотность мощности процесса.

Диагностирование процесса приработки проводилось на трех буровых насосах: записывались значения силы тока статора электродвигателя

с помощью осциллографа через равные промежутки времени. Замеры проводились при работе насосов под полной нагрузкой. Обработка результатов измерений проводилась на базе теории случайных процессов по специально разработанной программе.

Первоначально определялись следующие параметры:

- математическое ожидание:

$$\bar{m}_x = \sum_{i=1}^n x_i / n,$$

где x_i – результат измерения случайной величины, n – количество независимых измерений случайной величины в процессе опыта;

- дисперсия:

$$D_x = [x_i - m_x]^2 / (n-1);$$

- среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma_x = \sqrt{D};$$

- коэффициент вариации:

$$V_x = \sigma_x / m_x.$$

Каждую полученную реализацию проверяли на стационарность и эргодичность по однородности ряда математических ожиданий и по наличию постоянства величины дисперсии [5; 6]. При анализе однородности ряда математических ожиданий и по наличию постоянства величины дисперсии рассматривались не все полученные эмпирические значения случайной величины, а значения в стабилизированной выборке с оптимальным шагом дискретности для так называемых «качественного» и «некачественного» буровых насосов. Под «качественным» понимался тот насос, для которого после приработки не потребовалась дополнительная разборка и доводка.

Проверка стационарности по однородности ряда математических ожиданий с использованием критерия t_α распределения Стьюдента [7] проводилась из условия [8]:

$$t_\alpha < t_{\alpha_0},$$

где

$$t_\alpha = \frac{[m_{x1} - m_{x2}]}{Sm_x},$$

t_{α_0} – допустимая величина, определяемая в зависимости от коэффициента доверия (в нашем случае равном 0,95) и числа степеней свободы, зависящего от объема выборок, по которым проводится сравнение.

$$G_i > G_{\max}$$

где G_{\max} – критерий Фишера:

$$G_{x \max} = \frac{D_{x \max}}{\sum_{x=1}^m D_x};$$

G_i – значение критерия Фишера, определяемое в зависимости от количества значений случайной величины в стабилизированной выборке и количества реализаций.

Помимо исследования случайного процесса на условия стационарности, необходимо выявить еще одно свойство процесса – эргодичность. Случайная функция обладает свойством эргодичности, если все ее реализации имеют одни и те же статистические свойства. Это подтверждается однородностью ряда математических ожиданий и наличием постоянства величины дисперсии.

Согласно проведенным расчетам, для «качественного» и «некачественного» буровых насосов гипотеза о равенстве двух выборочных средних значениях процесса с использованием распределения Стьюдента не отвергается, критерий Фишера подтверждает независимость дисперсии от времени. Неравенства имеют вид:

- для «качественного» насоса: $t_\alpha = 0,9099 < t_{\alpha_0} = 1,96$,
 $G_i = 2,40 > G_{\max} = 1,79932$;

- для «некачественного» насоса: $t\alpha = 1,82399 < t\alpha_0 = 1,96$,
 $G_i = 1,55 > G_{\max} = 1,456$.

Следовательно, дисперсия случайного процесса постоянна, гипотеза о стационарности не отвергается, процесс эргодичен.

Оценив свойства стационарности и эргодичности процесса приработки, нами были определены динамические характеристики случайного процесса. Важнейшими динамическими характеристиками случайного процесса являются автокорреляционная функция $R(\tau)$ и спектральная плотность $S(\omega)$. По автокорреляционной функции можно судить о стабильности случайного процесса, так как эта характеристика дает некоторую вероятностную информацию о процессе во временной области. Спектральная плотность $S(\omega)$ дает вероятностную информацию о процессе в частотной области. По своему физическому смыслу $S(\omega)$ есть величина, которая пропорциональна средней мощности процесса в интервале частот от ω до $(\omega + d\omega)$. Спектральная плотность и автокорреляционная функция случайного процесса представляют собой взаимные преобразования Фурье. Связь между спектральной плотностью $S(\omega)$ и видом функции времени $x(t)$ заключается в том, что чем «уже» график спектральной плотности, т. е. чем меньшие частоты представлены в спектральной плотности, тем медленнее изменяется величина $S(\omega)$ во времени. Связь между спектральной плотностью и видом функции времени получается обратной по сравнению со связью между автокорреляционной функцией и самим процессом.

Для проведения сравнительного анализа были выбраны результаты по трем насосам, для двух из которых приработка прошла успешно, а у третьего приработка не закончилась. Один из «качественных» насосов прошел приработку на масле с добавлением присадки МКФ-18УМ: в картер насоса было залито 3,5 литра присадки из расчета 1 объемный %. Введение прирабочной присадки МКФ-18УМ сместило частотный спектр процесса в область низких частот (табл. 1). Приработка первого и второго насосов происходит в интервале частот $\Delta\omega = (216-1256)$ Гц, а приработка третьего насоса в интервале $\Delta\omega' = (12-48)$ Гц.

По результатам расчетов были построены графики изменения спектральной плотности во времени приработки. Анализируя графики, можно сделать вывод, что спектральные плотности «некачественного» бурового насоса выше, чем «качественного» на интервалах частот ω_1 и ω_3 , что свидетельствует о низком качестве изготовления первого насоса.

Таблица 1

Изменение спектральной плотности во времени приработки

S(ω)	Время приработки, минута														
	5-я			30-я			55-я			65-я			90-я		
	ω_1	ω_2	ω_3	ω_1	ω_2	ω_3	ω_1	ω_2	ω_3	ω_1	ω_2	ω_3	ω_1	ω_2	ω_3
S'(ω)	2,86	1,37	1,63	2,75	0,30	2,59	3,04	1,81	1,09	6,30	0,12	1,47	3,45	0,96	1,65
S''(ω)	1,14	0,83	1,56	2,82	3,64	1,62	3,01	0,90	1,83	1,97	0,64	1,29	3,06	0,82	1,17
S'''(ω)	0,18	0,16	0,05	0,41	0,26	0,22	0,60	0,42	0,28	0,78	0,35	0,37	0,79	0,39	0,42

Детали узла, имеющего собственные частоты в области ω_3 , выполнены более качественно, чем детали узлов, имеющих частоты в областях ω_1 и ω_2 , о чем говорит незначительное изменение спектральной плотности во времени приработки в области ω_3 . На момент окончания приработки (90-я минута) на интервале частот ω_1 , мощность процесса $S\omega_1$ имела стабильный характер (рис. 1), на интервале ω_2 спектральная плотность $S\omega_2$ стабилизировалась (рис. 2), значение $S''\omega_3$ для «качественного» насоса было в 1,4 раза ниже, чем для «некачественного» – $S'\omega_3$ (рис. 3).

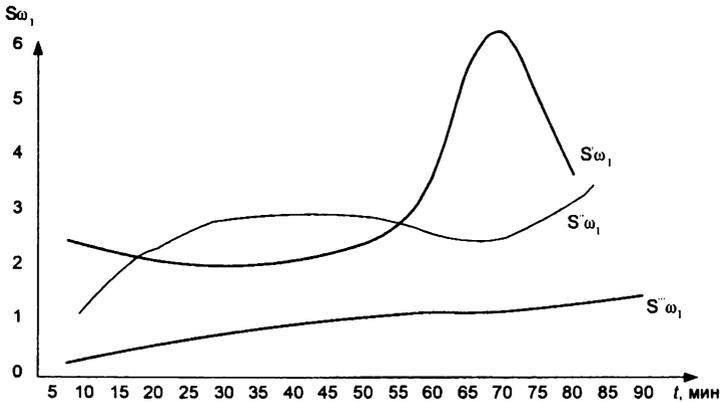


Рис. 1. Изменение спектральной плотности приработки «качественного» и «некачественного» буровых насосов во времени процесса на частоте ω_1

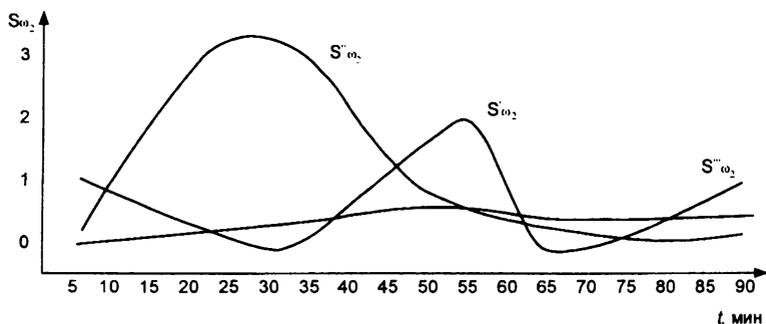


Рис. 2 Изменение спектральной плотности приработки «качественного» и «некачественного» буровых насосов во времени процесса на частоте ω_2

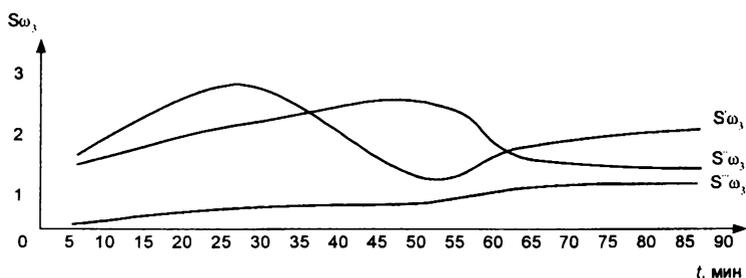


Рис. 3. Изменение спектральной плотности приработки «качественного» и «некачественного» буровых насосов во времени процесса на частоте ω_3

На графиках (см. рис. 1–3) видно, что значения спектральной плотности S'''_{ω_i} на частотах $\omega'_1, \omega'_2, \omega'_3$ в 2–15 раз ниже, чем S''_{ω_i} и S'_{ω_i} ; графики $S'''_{\omega_1}(t), S'''_{\omega_2}(t), S'''_{\omega_3}(t)$ имеют стабильный характер. Все это подтверждает предположение о противозадирном и антифрикционном действии присадки в процессе приработки узлов трения бурового насоса. Начиная с 65-й минуты, величина спектральной плотности стабилизировалась, что говорит об окончании процесса приработки. Низкая динамика процесса приработки механической части насоса подтверждает вывод о малых потерях на трение в узлах.

Этот вывод был подтвержден макроскопическими исследованиями поверхностей трения основных деталей механической части насоса (рабочих поверхностей зубьев колес, направляющих и ползунов кривошипно-шатунной группы). Пятно контакта в зацеплении у «качественных» насосов соответствовало требованиям чертежа, в то время как у первого насоса его величина составляла не более 59% от требуемых значений как по высоте зубьев, так и по их длине.

После 90-й минуты приработки на 2-м и 3-м насосах, приработанных на обычном масле и масле с присадкой МКФ-18У, была замерена шероховатость рабочих поверхностей зубьев колеса в зоне фактического контакта. Для этого использовался микропрофилометр марки «Диавит» МТ-30 МААГ (база измерений 2 мм). Аналогичные измерения шероховатости на маркированных зубьях колес насосов № 2 и № 3 проводилась до приработки. Результаты замеров показали, что шероховатость контактных поверхностей зубьев после приработки на обычном масле снижается в 3–4 раза, а после приработки с присадкой – в 20–25 раз (табл. 2).

Таблица 2

Шероховатость контактных поверхностей зубьев

Режим приработки	Шероховатость, мкм			
	До приработки		После приработки	
	средняя по пятну контакта	минимальная в пятне контакта	средняя по пятну контакта	минимальная в пятне контакта
Насос № 2 без присадки	41,6	32,0	13,4	7,8
Насос № 3 1,5 массовый % МКФ-18У	42,8	35,8	5,12	1,38

Способ макроприработки редуктора бурового насоса с применением металлолакирующей присадки МКФ-18У, позволяет снизить среднюю шероховатость поверхностей трения до $Ra \leq 0,8$, $Rz \leq 6,0$, и сократить время приработки в 1,5–2 раза.

Результаты эксперимента показали, что с помощью приработки можно:

- повысить долговечность и надежность изделия путем увеличения пятна контакта зубьев и снижения средней шероховатости поверхностей трения;

- сократить число внезапных отказов в будущем;

• критерием окончания процесса приработки можно считать выравнивание автокорреляционной функции электрических параметров привода.

Таким образом, введение технологической приработки в процесс изготовления буровых насосов позволяет повысить их надежность.

Библиографический список

1. Машиностроение: Энцикл.: В 40 т. / Под общ. ред. О. А. Банных, Н. Н. Александрова. М., 2001. Т. III-7: Технология производства машин. Измерения, контроль, испытания и диагностика
2. Генкин М. Д., Рыжов М. А., Рыжов Н. М. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач. М., 1981.
3. Калашиников В. В. Количественная оценка в теории надежности. М., 1989.
4. Математическое обеспечение сложного эксперимента: Справ. / Под общ. ред. И. И. Ляшко. Киев, 1983.
5. Гремлов А. А. Анализ и синтез стохастических систем. М., 1990.
6. Математические модели систем и процессов: Сб. науч. тр. / Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 1994. № 2, вып. 2.
7. Пуанкаре А. Теория вероятностей. Пер. с фр. / Науч. ред. А. В. Летчиков. Ижевск, 1999.
8. Карциов Р. Н. Обработка экспериментальной информации. Саратов, 2001.