

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА  
ИМИТАЦИОННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ**

*Рассматривается методологическая и методическая основа разработки имитационных моделей для прогнозирования технического состояния механических систем с использованием теоремы синтеза многоядерных систем.*

**Ключевые слова** прогнозирование, моделирование, техническое состояние, система, структурный граф.

Механическая система представляет собой совокупность элементов связанных между собой, но действующих как одно целое изделие и призванное обеспечить соответствие выходных параметров расчетным.

В процессе эксплуатации изделия происходит изменение параметров элементов (как следствие нагрева, истирания и др.), а, следовательно, изменяются и физические связи. Проследить за изменением некоторых параметров механической системы позволяют информационные связи в виде таблиц замеров параметров, отчетов о наблюдениях за работой объекта и др.

Создание абстрактной модели — это разработка имитационной модели механической системы. Имитационное моделирование предполагает описание системы в терминах, приемлемых для вычислительной техники.

Имитация — это представление динамического поведения механической системы движением от состояния к состоянию в соответствии с определенными правилами или условиями воздействия внешних и внутренних факторов.

Моделируются все характеристики, которые используются для описания желаемых свойств и те, которые имеют влияние на эти свойства и контролируются в целевой системе конструктором.

Для создания имитационной системы должны быть выполнены следующие действия:

1. Обобщение априорных знаний об имитируемой системе, её доступности для экспериментов и возможности наблюдать функционирование без воздействия на её общее поведение.
2. Формулирование проблемы и требований к выходным параметрам для построения имитационной модели.
3. Построение имитационной модели.
4. Проведение экспериментов — для нахождения решений.
5. Применение полученных решений.
6. Документирование модели и результатов.

Проектирование имитационной модели начинается с формулирования проблемы и объединяет действия до завершающего этапа компьютерной программы по проведению имитационных экспериментов. Формулировка проблемы содержит положения о желаемых границах значений некоторых целевых характеристик, а величины целевых характеристик могут быть получены посредством наблюдения за имитируемой системой. Некоторые целевые характеристики могут быть связаны с

компонентами системы и, следовательно, являются непосредственно наблюдаемыми. В ином случае должны быть найдены отношения между целевыми характеристиками и характеристиками компонент системы. Наблюдая за этими характеристиками, мы можем вычислить значения целевых характеристик.

Для разработки имитационной модели шестеренных гидромашин предлагается следующая последовательность:

- формулирование цели моделирования насоса для обеспечения учета и оценки изменения выходных параметров (подачи, давления, мощности и КПД) в зависимости от изменяемых параметров;
- составление структурно-логической схемы воздействия и взаимовлияния параметров основных элементов системы на выходные параметры;
- построение графа связности с учетом данных о влиянии факторов различного рода на выходные параметры, где четко и наглядно прослеживается взаимосвязь и взаимовлияние конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров элементов системы и выходных параметров;
- по графу связности разрабатывается структурная схема и структурный граф, по которому составляется матричное уравнение системы.

Методология прогнозирования индивидуального остаточного ресурса в принципе не отличается от методологии прогнозирования на стадии проектирования, однако, различие состоит в том, что в дополнении к априорной информации о материалах, узлах, нагрузках следует использовать текущую информацию, полученную на стадии эксплуатации объекта.

Шестеренные насосы являются подсистемами гидравлического привода как сложной механической системы. В свою очередь насосы НШ, являются сложными механическими системами со всем комплексом характеристик, а техническое состояние НШ оценивается выходными параметрами, т.е. подачей, объемным коэффициентом полезного действия и мощностью насоса.

Разработанная схема связности (рис.1) конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров, влияющих на функционирование насоса, позволяет выбрать основные параметры для оценки технического состояния насосов в период их эксплуатации.

\* – автор, с которым следует вести переписку.

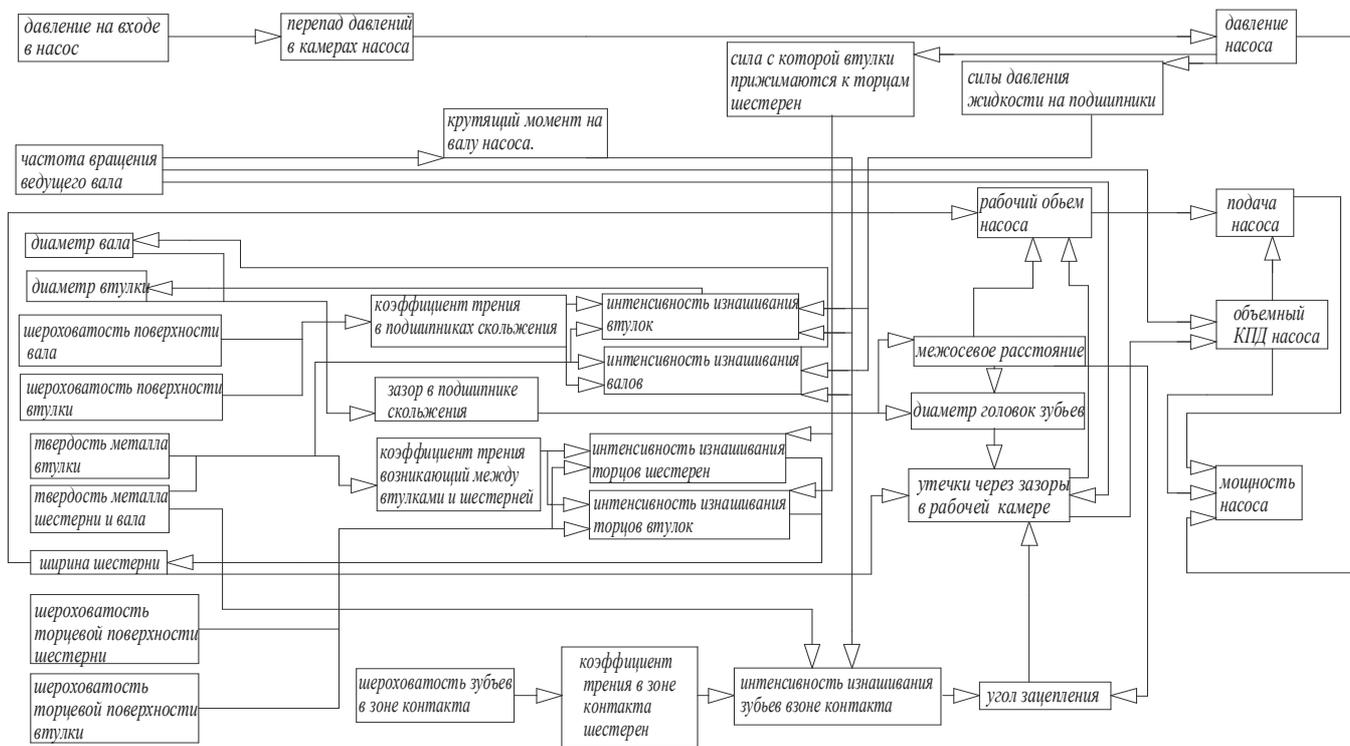


Рис.1. Схема связности конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров влияющих на функционирование насоса

Анализ схемы связности свидетельствует о том, что насос нужно рассматривать как многофакторную систему, а для формализации в математическом виде взаимосвязи множества параметров, характеризующих техническое состояние насосов, следует использовать метод топологии.

При помощи методики синтеза многосвязных систем [2] были получены матричные уравнения функциональных зависимостей:

$$Q(X_{50}) = f(X_1, X_{20}, X_{21}, X_{43}); \quad (1)$$

$$\eta(X_{54}) = f(X_1, X_{20}, X_{21}, X_{43}); \quad (2)$$

$$P(X_{57}) = f(X_1, X_2, X_{20}, X_{21}, X_{43}), \quad (3)$$

где  $X_{50}$  — подача насоса ( $Q$ , л/мин);  $X_{54}$  — объемный КПД ( $\eta$ );  $X_{57}$  — мощность насоса ( $P$ , кВт);  $X_1$  — частота вращения приводного вала ( $n$ , об/мин);  $X_2$  — давление в напорной камере насоса ( $p_2$ , МПа);  $X_{20}$  — диаметр вала шестерни ( $d_{вал}$ , мм);  $X_{21}$  — диаметр отверстия втулки ( $D_{вт}$ , мм);  $X_{43}$  — ширина шестерни ( $b$ , мм).

Для параметрической идентификации уравнений (1)-(3) выбран метод регрессионного анализа, который включает методы отыскания параметров математической модели и статистической обработки данных, полученных экспериментально или заимствованных из отчетов натурных испытаний насосов НШ-10. Математическую модель функционирования шестеренного насоса запишем в виде

$$Y = \sum B \cdot X$$

где  $B$  — матрица-столбец коэффициентов регрессионной модели, равная

$$B = [X' \cdot X]^{-1} \cdot X' \cdot Y,$$

где  $X$  — матрица результатов наблюдений за параметрами;

$Y$  — матрица-столбец результатов измерений выходных параметров.

На основании матричных уравнений получена математическая модель, решение которой велось с использованием экспериментальных замеров геометрических параметров: диаметров валов  $d_{вал}$ ; подшипников скольжения  $D_{вт}$ ; ширины шестерен  $b$ . Математическая модель составлена при следующих допущениях:

- обороты вала насоса постоянны;
- стенки напорного трубопровода абсолютно жесткие;
- диаметр напорного трубопровода постоянный по всей длине;
- давление в напорной гидролинии постоянно;
- температура рабочей жидкости постоянна.

Для получения регрессионной модели с коэффициентами использовались экспериментальные данные геометрических размеров элементов и подачи для насосов одного типа, отработавших до различной степени износа этих элементов. Результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1  
Экспериментальные замеры параметров шестеренного насоса НШ-10

№	НАИМЕНОВАНИЕ			
	$d_{вал}$ , мм $X_{20}$	$D_{вт}$ , мм $X_{21}$	$b$ , мм $X_{43}$	$Q$ , л/мин $X_{50}$
1	17,935	17,956	16,290	16,4
2	17,931	17,965	16,285	15,1
3	17,926	17,969	16,260	14,7
4	17,925	17,971	16,240	13,2
5	17,922	17,989	16,170	12,4
6	17,915	18,035	16,120	11,0
7	17,915	18,067	16,010	10,2
8	17,891	18,089	15,902	9,0

На основании данных таблицы 1 получены регрессионные модели изменения подачи насоса

$$Q = 3,4n + 29,2 d_{вал} - 35,2 D_{вм} + 1,7b. \quad (4)$$

Для объемного КПД насоса регрессионная модель представлена уравнением

$$\eta = -0,07n + 1,99d_{вал} - 1,99D_{вм} + 0,2b.$$

Для мощности насоса регрессионная модель представлена уравнением

$$P = 0,1n - 0,3p_2 + 1,03 d_{вал} - 0,9 D_{вм} + 0,2b.$$

Q, л/мин

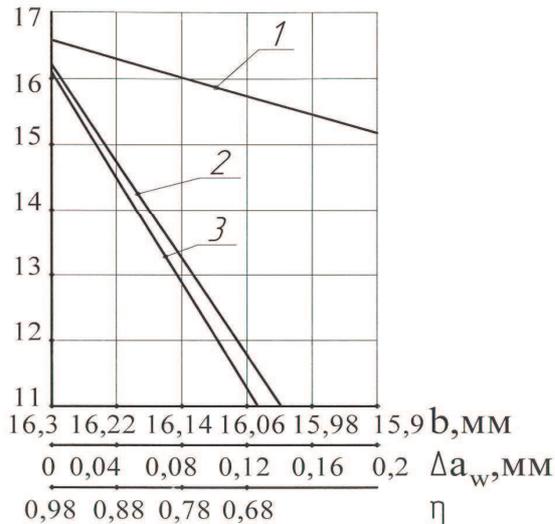


Рис. 2. График изменения подачи насоса НШ-10: Схема связности конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров, влияющих на функционирование насоса

Проведенные теоретические исследования позволили получить аналитическую зависимость для определения подачи насоса как функции износа подшипников скольжения (изменение межосевого расстояния)  $\Delta a_w$  и ширины  $b$  зуба

$$Q_T = 2 \cdot b \cdot n \cdot [\pi \cdot r_n \cdot (h - \Delta a_w) - 5 \cdot l_3 \cdot \Delta a_w] \eta. \quad (5)$$

Сравнение результатов, полученных с помощью аналитической зависимости и регрессионной модели определения подачи насоса с учетом изменения межосевого расстояния и ширины шестерен в насосе, приведены на рис.2. Прямая 1 получена с помощью аналитической зависимости (5) без учета объемного коэффициента полезного действия. Прямая 2 — с помощью регрессионной модели (4) определения подачи насоса с учетом изменения межосевого расстояния и ширины шестерен в насосе. Прямая 3 получена с помощью аналитической зависимости (5) с учетом объемного КПД.

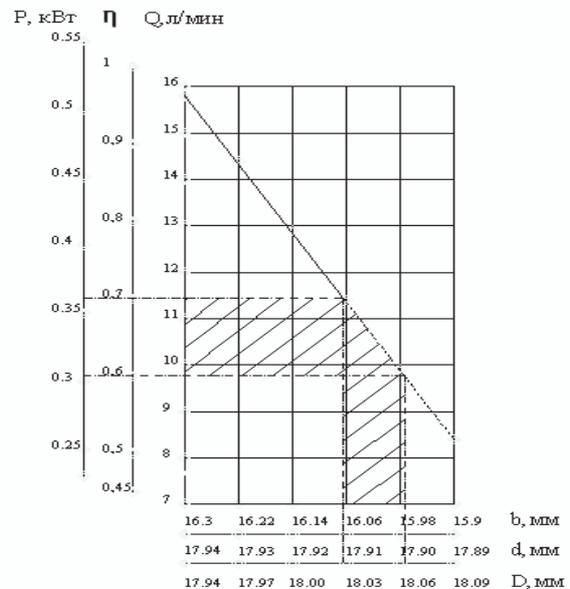


Рис. 3. Номограмма для определения параметров насоса НШ-10 по подаче Q, замеренной на стенде или на работающем агрегате гидродвижителя:  $Q_T$  — теоретическая подача, л/мин;  $b$  — ширина шестерен насоса, мм;  $n$  — частота вращения ведущего вала, об/мин;  $r_n$  — радиус начальной окружности шестерен насоса, мм;  $h$  — высота головок зубьев, мм;  $\Delta a_w$  — величина изменения межосевого расстояния, мм;  $l_3$  — длина активной зоны поверхности зуба, мм.

С помощью системы регрессионных уравнений построена номограмма (рис.3), позволяющая прогнозировать состояние выходных параметров шестеренного насоса в зависимости от изменения геометрических размеров элементов конструкции или деталей.

Прогнозирование технического состояния насоса, можно осуществлять методом замера подачи в гидросистеме на работающей машине. Подача замеряется во время технического освидетельствования машины посредством расходомера, устанавливаемого в систему после редуцирующего клапана и распределителя. Используя номограмму, получаем значения КПД и мощности, для проверяемого насоса. Заштрихованный сегмент — зона риска для нормальной эксплуатации гидрофицированной машины.

Литература

1. Левин, А. И. Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков / А. И. Левин. — М. : Машиностроение, 1978. — 184 с.
2. Алпатов, Ю. Н. Синтез систем управления методом структурных графов. — / Ю. Н. Алпатов. — Иркутск : Изд-во Иркут. гос.ун-та, 1988. -184 с.
3. Системный анализ : Проектирование оптимизация и приложения : моногр. [в 2 т.] /А. Антамошкин [и др.] ; под общ. ред. А. Антамошкина ; Междунар. инженер. акад. Сиб. отд. — Красноярск : САА, 1996. — Т. 1. — 206 с.
4. Системный анализ: Проектирование оптимизация и приложения : моногр. [в 2 т.] / А. Антамошкин, [и др.] ; под общ. ред. А. Антамошкина ; Междунар. инженер. акад. Сиб. отд. — Красноярск : САА, 1996. — Т. 2. — 290 с.