

УДК 004.67

UDC 004.67

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ДВИГАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК**

**FORECASTING THE PARAMETERS OF THE
TECHNICAL CONDITION OF POWER PLANT
ENGINES**

Шевцов Юрий Дмитриевич
д.т.н., профессор
SPIN-код: 9894-7734
E-mail: shud48@rambler.ru

Shevtsov Yuriy Dmitrievich
Dr.Sci.Tech., professor
SPIN-code: 9894-7734
E-mail: shud48@rambler.ru

Дудник Людмила Николаевна
к.т.н.
SPIN-код: 3750-4932
E-mail: lududnik@mail.ru

Dudnik Lyudmila Nikolaevna
Cand.Tech.Sci.
SPIN-code: 3750-4932
E-mail: lududnik@mail.ru

Арефьева Светлана Александровна
к.т.н., доцент
SPIN-код: 9371-2755
E-mail: 4492698@mail.ru

Arefyeva Svetlana Aleksandrovna,
Cand.Tech.Sci., associate professor
SPIN-code: 9371-2755
E-mail: 4492698@mail.ru

Фадеев Евгений Дмитриевич
аспирант

Fadeev Evgeniy Dmitrievich
postgraduate student

Полугодкин Роман Сергеевич
аспирант
*Кубанский государственный технологический
университет, Краснодар, Россия*

Polugodkin Roman Sergeevich
postgraduate student
*Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia*

В статье предложена методика построения алгоритма и модели прогнозирования для совокупности информативных параметров, описывающих техническое состояние двигателей энергетических установок с возможностью оценки ошибки прогноза

In this article, an algorithm and a forecasting model for a set of informative parameters are proposed. These parameters describe the technical condition of power plant engines with a possibility of estimating the forecast error

Ключевые слова: МОДЕЛЬ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ, ТЕХНИЧЕСКОЕ
СОСТОЯНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ, ПАРАМЕТРЫ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ, ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ

Keywords: MODEL FORECASTING, TECHNICAL
CONDITION OF ENGINES, FORECASTING
PARAMETERS, TIME SERIES

Doi: 10.21515/1990-4665-132-042

Введение

Эффективным методом повышения эксплуатационной надежности двигателей энергетических установок и других альтернативных источников энергопитания является прогнозирование параметров, определяющих изменение технического состояния объектов контроля во времени.

Целью исследования является повышение эксплуатационных характеристик двигателей энергетических установок (ЭУ) за счет получения достоверной информации при контроле и прогнозировании их технического состояния. В связи с этим возникает необходимость в разработке и применении модели и алгоритма прогнозирования параметров технического состояния двигателей дизельных электростанций (ДЭС) и оценки точности применения прогнозирования.

Для реализации данной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать модель прогнозирования для информативной совокупности параметров технического состояния двигателя дизельных электростанций (ДЭС) и элементов системы смазки;
- выполнить прогноз параметров на заданную временную точку и оценить точность полученных результатов.

1. Анализ временных рядов параметров, используемых для прогнозирования технического состояния двигателей ДЭС

Авторами в работе [1] исследованы параметры, которые используются для оценки технического состояния двигателя и элементов системы смазки и влияют на время их необслуживаемой работы. Выявлены зависимости параметров от изменяющихся условий и продолжительности эксплуатации, а также осуществлен выбор совокупности наиболее информативных параметров, которые могут быть использованы при контроле и прогнозировании технического состояния двигателей ДЭС на основе методов факторного анализа.

Изменения параметров, характеризующих техническое состояние двигателя и элементов системы смазки, во времени можно статистически представить в виде временных рядов. Значения временных рядов формируются на основе измерений контролируемых параметров в фиксированные моменты времени и могут быть представлены графическим или табличным способом. В общем случае, задачей

прогнозирования является отыскание закономерности, характеризующей временной ряд на участке наблюдения, построенный по эмпирическим данным и экстраполяции этой закономерности на упреждающий интервал времени.

Таким образом, возникает вопрос, как по эмпирическим данным наилучшим образом воспроизвести зависимость прогнозируемого параметра y_i от t_i . Этот вопрос решается путем применения процедуры выравнивания временных рядов, суть которой заключается в том, что подбирается теоретическая плавная кривая, наилучшим образом описывающая имеющиеся эмпирические данные.

Формирование временного ряда данных y_1, y_2, \dots, y_n заключается в представлении его в виде вариационного ряда с последующим табличным или графическим отображением. Вариационный ряд получается в результате размещения исходных величин y_n в порядке изменения их значений при $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$, где n – количество измерений (наблюдений), t_i – номера наблюдений, y_i – значение измеряемого параметра в момент времени t_i , $i = 1, \dots, n$.

Процесс выравнивания временного ряда состоит из двух основных этапов: выбора типа кривой, форма которой соответствует характеру изменения временного ряда, определения численных значений параметров кривой. Существует несколько практических подходов к выбору формы теоретической кривой. Наиболее простой путь – визуальный на основе графического изображения временного ряда.

При исследовании наиболее информативных параметров двигателей ДЭС и определении зависимостей изменения их от времени, был сделан вывод о том, что эти зависимости могут быть представлены в графическом виде и описываться полиномами различного порядка (Рис.1-3).

Таким образом, для основных информативных характеристик: амплитуды амплитудно-частотных характеристик фильтра на резонансной

частоте $A_3(\omega)$, активной составляющей гидравлического сопротивления фильтра R_ϕ , и скорости изменения амплитудно-частотной характеристики фильтра $V_I(\omega)$, описывающих техническое состояние двигателей ДЭС, прогноз на упреждающий интервал времени (заданную временную точку) предлагается выполнить на основе методов экстраполяции с помощью полиномов.

2. Построение модели прогнозирования параметров технического состояния двигателя дизельных электростанций (ДЭС) и элементов системы смазки

В основе моделирования временного ряда (ВР) любого из выбранных для прогнозирования параметров $y(t)$ лежит представление его в виде суммы двух компонент – детерминированной составляющей $f(t)$ – функции тренда и случайного отклонения $\varepsilon(t)$ (ошибки).

$$y(t) = f(t) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $y(t)$ - математическая модель числового ряда,

t – порядковый номер элемента временного ряда, $t=1, 2, 3 \dots n$;

n – число элементов временного ряда.

Функция $f(t)$ должна иметь такой вид, чтобы сумма квадратов отклонений $\varepsilon(t)$ была минимальной, т.е.

$$\sum_{t=1}^n [y(t) - f(t)]^2 = \sum_{t=1}^n \varepsilon(t)^2 \Rightarrow \min. \quad (2)$$

Построение прогнозирующей модели динамического ряда рекомендуется проводить в три этапа:

- построение детерминированной части модели ВР – составляющей $f(t)$;
- построение стохастической части модели – составляющей $\varepsilon(t)$;
- определение полного прогноза ВР на основе результатов двух предыдущих этапов $y(t) = f(t) + \varepsilon(t)$.

Этап 1. Построение детерминированной части модели временного ряда – составляющей $f(t)$.

Выполним построение модели прогнозирования для амплитуды амплитудно-частотных характеристик фильтра на резонансной частоте $A_3(\omega)$.

Из графика зависимости изменения $A_3(\omega)$ от времени (Рис.1) видно, что функцией тренда для данного параметра является полином третьего порядка:

$$f(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \tag{3}$$

Определим неизвестные коэффициенты a_0, a_1, a_2, a_3 для функции тренда полиномиального типа третьего порядка. Предварительно составим и заполним вспомогательную таблицу, используя табличный процессор *MS Excel*:

Таблица 1 Вспомогательная таблица для расчетов коэффициентов полинома a_0, a_1, a_2 и a_3 .

$A_3(\omega)$	t	t^2	t^3
1,95	1	1	1
1,25	2	4	8
0,95	3	9	27
0,8	4	16	64
0,65	5	25	125
0,55	6	36	216
0,52	7	49	343
0,51	8	64	512
0,505	9	81	729
0,5	10	100	1000
	11	121	1331

По формуле ЛИНЕЙН () находим коэффициенты a_0, a_1, a_2 и a_3 .

$$a_0=2,617667; a_1=-0,83501; a_2=0,111002; a_3=-0,00489.$$

Функция тренда заданного временного ряда $f(t)$ может быть представлена уравнением:

$$f(t)=2,618 - 0,835t+0,111t^2-0,0049t^3 \tag{4}$$

После того, как определена функция, описывающая данные, полученные в результате наблюдений (измерений), осуществляется прогноз исходного временного ряда для некоторого момента времени $t=T+l$, где T – время последнего наблюдения, l – временная точка прогноза (интервал упреждения). В итоге получают точечную оценку прогнозируемого показателя.

Значения точечного прогноза для исходного временного ряда на один шаг вперед можно вычислить с помощью уравнения функции тренда $f(t)$, найденного по методу наименьших квадратов. Для этого в полученное для $f(t)$ выражение необходимо подставить значения $t=10$. В результате получим $f(t)=0,474601$.

Этап 2. Построение стохастической части модели ВР

Для прогнозирования случайной компоненты $\varepsilon(t)$ используется метод авторегрессии, сущность которого заключается в том, что значения $\varepsilon(t)$ в последующие моменты времени зависят от его же значений в предыдущие моменты времени:

$$\varepsilon_t = a_1 \varepsilon_{t-1} + a_2 \varepsilon_{t-2} + a_3 \varepsilon_{t-3} + \dots + a_p \varepsilon_{t-p} + u_t \quad (5)$$

где a_1, a_2, \dots, a_p – коэффициенты уравнения авторегрессии;

u_t – ошибка (случайное отклонение) авторегрессии.

Коэффициенты a_1, a_2, \dots, a_p рассчитывают на основе метода наименьших квадратов из условия минимума дисперсии отклонений в фиксированной выборке из n наблюдений:

$$\sum_{t=p+1}^n \left(\varepsilon_t - \sum_{j=1}^p a_j \cdot \varepsilon_{t-j} \right)^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

Выражение $\varepsilon(t) = a_1 \varepsilon_{(t-1)} + u(t)$, описывает уравнение авторегрессии первого порядка, а $\varepsilon(t) = a_1 \varepsilon_{(t-1)} + a_2 \varepsilon_{(t-2)} + \dots + a_m \varepsilon_{(t-m)} + u(t)$ – второго порядка.

В качестве автокорреляционной связи определим взаимную связь между соседними точками числового ряда погрешностей аппроксимации $\varepsilon(t)$.

Для каждого наблюдения ряда необходимо рассчитать отклонения $\varepsilon(t)$, как разность $\varepsilon_t = Y - Y_{np1}$ между соответствующими данными столбцов.

Таким образом, результаты расчета методом наименьших квадратов случайной компоненты $\varepsilon(t)$ представлены в таблице 2.

Этап 3. Расчет оценок полного прогноза

Определение полного прогноза временного ряда на основе результатов двух предыдущих этапов $y(t) = f(t) + \varepsilon(t)$.

На основе полученных расчетов значение полного прогноза параметра амплитуды амплитудно-частотных характеристик фильтра на резонансной частоте $A_3(\omega)$ на заданную временную точку $t = 10$ составляет $y(t) = 0,476488$.

Таблица 2 Таблица расчетов детерминированной части модели ВР $f(t) - Y_{np1}$, случайной компоненты $\varepsilon(t)$ и определение полного прогноза Y_{np2} .

$Y (A_3)$	t	Y_{np1}	$\varepsilon (t)$	$\varepsilon (t-1)$	ε_{np}	Y_{np2}
1,95	1	1,888762	0,061238			1,888762
1,25	2	1,352503	-0,1025	0,061238	-0,00534	1,34716
0,95	3	0,979531	-0,02953	-0,1025	0,008944	0,988475
0,8	4	0,740487	0,059513	-0,02953	0,002577	0,743064
0,65	5	0,606012	0,043988	0,059513	-0,00519	0,600819
0,55	6	0,546746	0,003254	0,043988	-0,00384	0,542908
0,52	7	0,533331	-0,01333	0,003254	-0,00028	0,533047
0,51	8	0,536408	-0,02641	-0,01333	0,001163	0,537571
0,505	9	0,526618	-0,02162	-0,02641	0,002304	0,528922
0,5	10	0,474601	0,025399	-0,02162	0,001886	0,476488

На рисунке 1 представлены графики зависимости изменения $A_3(\omega)$ – амплитуды амплитудно-частотных характеристик фильтра на резонансной частоте от времени, функция тренда $f(t)$, представленная полином третьей степени и полный прогноз параметра Y_{np2} , вычисленный по формуле 1.

В результате расчетов по аналогичной методике определен полный прогноз для второго информативного параметра, описывающего техническое состояние двигателя ДЭС - активной составляющей гидравлического сопротивления фильтра R_ϕ .

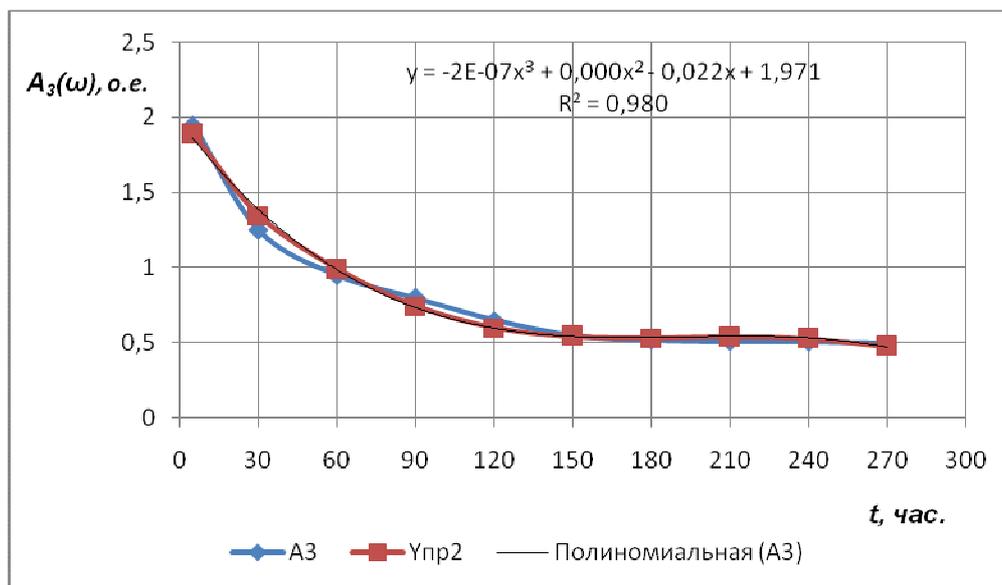


Рисунок 1. – Изменение $A_3(\omega)$ – амплитуды амплитудно-частотных характеристик фильтра на резонансной частоте от времени, функция тренда $f(t)$ – полином третьей степени и полный прогноз параметра $Y_{пр}$.

Зависимость активной составляющей гидравлического сопротивления фильтра R_ϕ от времени, трендовая составляющая $f(t)$, описываемая полиномом пятой степени, а также выполненный полный прогноз представлены на графике рис. 2.

Зависимость скорости изменения амплитудно-частотной характеристики фильтра $V_I(\omega)$ во времени, функция тренда представлена полиномом шестой степени и полный прогноз параметра $Y_{пр}$ отображается на графике рис. 3.

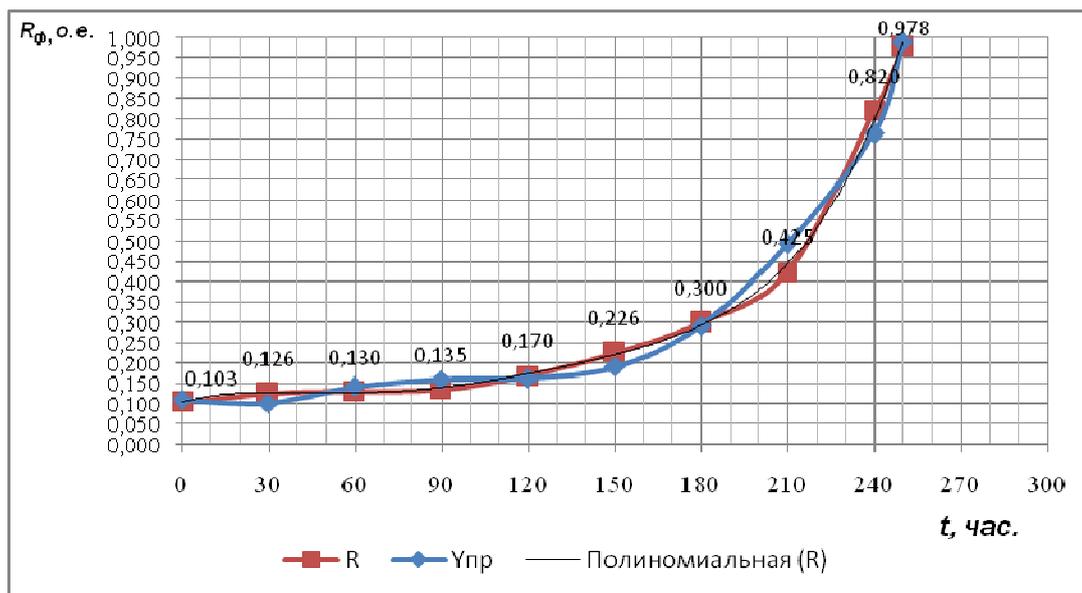


Рисунок 2. – Изменение R_{ϕ} – активной составляющей гидравлического сопротивления фильтра во времени, функция тренда $f(t)$ и полный прогноз $Y_{пр}$.

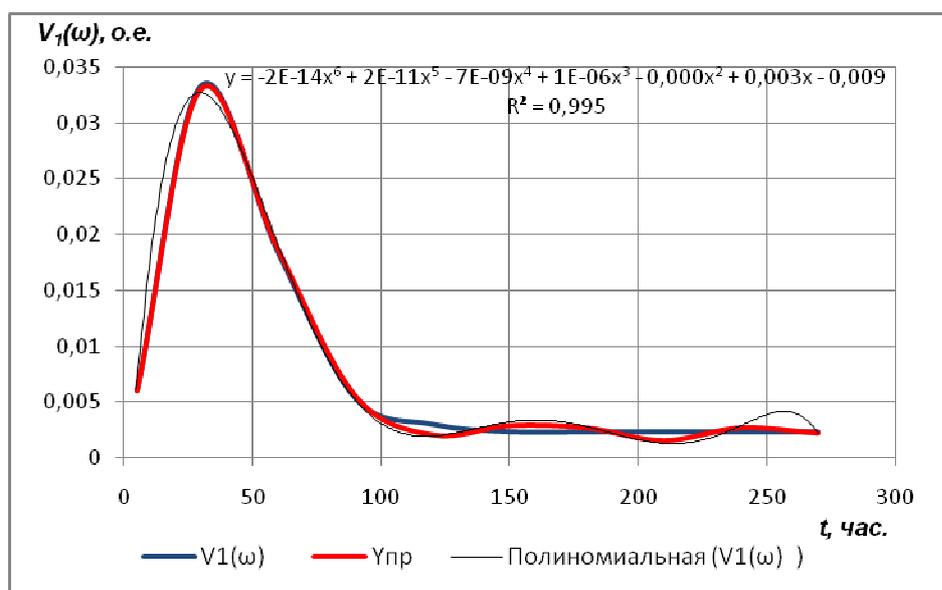


Рисунок 3. – Графики зависимости скорости изменения амплитудно-частотной характеристики фильтра $V_1(\omega)$ во времени, функции тренда $f(t)$ и полного прогноза $Y_{пр}$.

Проведем оценку точности прогнозирования по критерию минимума среднеквадратического отклонения СКО по следующей формуле:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i(t) - \hat{y}_i(t))^2 / (n - m)}, \quad (7)$$

где n – число измерений;

m – число слагаемых в модели;

$y_i(t)$ - результат i –го наблюдения;

$\hat{y}_i(t)$ - прогнозируемое значение по модели.

В результате расчетов получим точность $\sigma = 0,05578$.

Заключение

Предложенные модель и алгоритм прогнозирования технического состояния двигателей ДЭС позволяют выявить функцию тренда по имеющимся исходным данным контролируемого параметра, произвести экстраполяцию его значения на некоторый интервал упреждения, прогнозировать значения погрешности вычислений и формировать в итоге окончательный прогноз. Таким образом, предложен комплексный подход параметрического прогнозирования технического состояния двигателей, предполагающий на основе выбранной совокупности информативных параметров, определение тренда временного ряда значений параметра, выявление функции тренда с помощью метода наименьших квадратов, прогнозирование по полученной функции значений параметра на заданный временной интервал, оценку погрешности прогноза, прогнозирование величины погрешности методом авторегрессии на тот же интервал упреждения.

Список литературы:

1. Исследование, оценка и выбор параметров технического состояния двигателей при их контроле и прогнозировании // Шевцов Ю.Д., Атрощенко В.А., Дудник Л.Н., Горохов Д.А., Федотов Е.С. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. Издательство: Краснодар: КубГАУ, 2014. – № 104. С:1057-1076.

References

1. Issledovanie, ocenka i vybor parametrov tehničeskogo sostojanija dvigatelej pri ih kontrole i prognozirovanii // Shevcov Ju.D., Atroshhenko V.A., Dudnik L.N., Gorohov D.A., Fedotov E.S. Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. Izdatel'stvo: Krasnodar: KubGAU, 2014. – № 104. S:1057-1076.