

АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Вересников Г.С.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.65
veresnikov@mail.ru,

Скрябин А.В.

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского,
Россия, г. Жуковский, ул. Жуковского, д.1
aleksey.skryabin@tsagi.ru

Аннотация: В статье рассматривается проблема поиска информативных признаков для прогнозирования технического состояния электромеханического привода с использованием методов анализа временных рядов. Предлагаются алгоритмы, основанные на оптимизационных моделях, позволяющих найти диапазоны интегрирования спектра стационарного сигнала, обеспечивающие максимальные показатели качества тренда.

Ключевые слова: диагностика, электромеханический привод, спектральный анализ, оптимизационные модели, многокритериальная оптимизация.

Введение

В связи с развитием технологий, связанных с созданием электрических летательных аппаратов (ЛА), актуальна проблема разработки эффективных систем контроля технического состояния (СКТС) электромеханических приводов (ЭМП) [1]. Для решения этой проблемы в предыдущих исследованиях авторов [2] была предложена схема использования алгоритма оценки технического состояния ЭМП (рис. 1), построенного с использованием методов интеллектуального анализа данных.



Рис. 1. Схема анализа данных в режиме использования алгоритма оценки технического состояния ЭМП

В рамках этой схемы при решении задач диагностики в СКТС выделение информативных признаков применяется для повышения эффективности моделей классификации, с использованием которых анализируемое множество значений контролируемых параметров относится к определенному классу или уровню опасности в зависимости от возможных последствий сложившейся ситуации. Однако наиболее важной задачей является прогноз технического состояния ЭМП. Возникновение в процессе эксплуатации нештатной или аварийной ситуации может свидетельствовать о выходе из строя ЭМП, поэтому получение выводов о текущем состоянии контролируемого объекта не всегда является достаточным. Важной задачей анализа информации в СКТС является прогнозирование – определение негативных тенденций изменения технического состояния ЭМП заранее.

Задача прогнозирования технического состояния контролируемого объекта, рассматриваемая в мировой научной литературе, обычно заключается в том, чтобы на основе анализа временного ряда (ретроспективной информации), отражающего изменение известного информативного признака [3, 4]:

- найти математическую модель, описывающую временной ряд;
- оценить качество найденной математической модели;
- использовать математическую модель временного ряда для прогнозирования – экстраполяции значений временного ряда с последующей оценкой ожидаемого технического состояния контролируемого объекта.

При решении проблемы прогноза технического состояния ЭМП выбор информативных признаков для применения методов анализа временных рядов затруднителен. В связи с этим в статье рассматривается проблема поиска информативных признаков, которые могут быть эффективно использоваться при прогнозировании технического состояния ЭМП. Для решения этой проблемы предлагаются алгоритмы, в которых интегрированы методы спектрального анализа, анализа временных рядов, генетические алгоритмы. В известных работах с использованием спектрального анализа обычно решаются задачи распознавания неисправностей технических объектов [5,6], а применение методов анализа временных рядов ограничивается прогнозированием отдельных гармоник спектра [7]. Предлагаемые в статье оптимизационные модели и основанные на этих моделях алгоритмы позволяют найти диапазоны интегрирования спектра стационарного сигнала, обеспечивающие максимальные показатели качества тренда. Выделенные в результате информативные признаки могут использоваться для построения трендов, позволяющих произвести оценку ожидаемого технического состояния ЭМП, необходимую для обеспечения безопасности полета ЛА.

1 Оптимизационные модели для поиска информативных признаков

Пусть на основе измерений контролируемого параметра ЭМП с заданной периодичностью формируются стационарные временные последовательности, характеризующие техническое состояние электромеханического привода (проблема выбора периода между измерениями в рамках данной статьи не рассматривается). Номер временной последовательности (наблюдения) обозначим через $i=1, \dots, D$, где D – количество сформированных временных последовательностей.

Для каждого $i=1, \dots, D$ построим амплитудный спектр по известной формуле [1]:

$$y_i(m) = \frac{|b_i(m)|}{N}, b_i(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x_{ik} e^{-j\frac{2\pi mk}{N}}, m = 1, \dots, N,$$

где N – количество значений контролируемого параметра и одновременно количество спектральных отсчетов для дискретного преобразования Фурье; $b_i(m)$ – комплексные амплитуды (комплексные числа), полученные в результате применения дискретного преобразования Фурье к последовательности значений контролируемого параметра ЭМП; m – номер спектрального отсчета; j – мнимая единица (число, квадрат которого равен -1).

Для снижения влияния шумов, обусловленных внешними воздействиями и сочетанием множества типов деградаций ЭМП, на измеряемый сигнал предлагается анализировать последовательность $S_1(\bar{x}), \dots, S_D(\bar{x})$, состоящую из сумм амплитуд с номерами отсчетов, попадающими в диапазоны, задаваемые вектором \bar{x} . Нечетные и четные элементы вектора \bar{x} содержат номера отсчетов, определяющие соответственно левые и правые границы диапазонов интегрирования спектра. Количество диапазонов, задаваемых вектором \bar{x} , выбирается экспертом.

Процедура формирования последовательности сумм амплитуд $S_1(\bar{x}), \dots, S_D(\bar{x})$ проиллюстрирована на рис. 2.

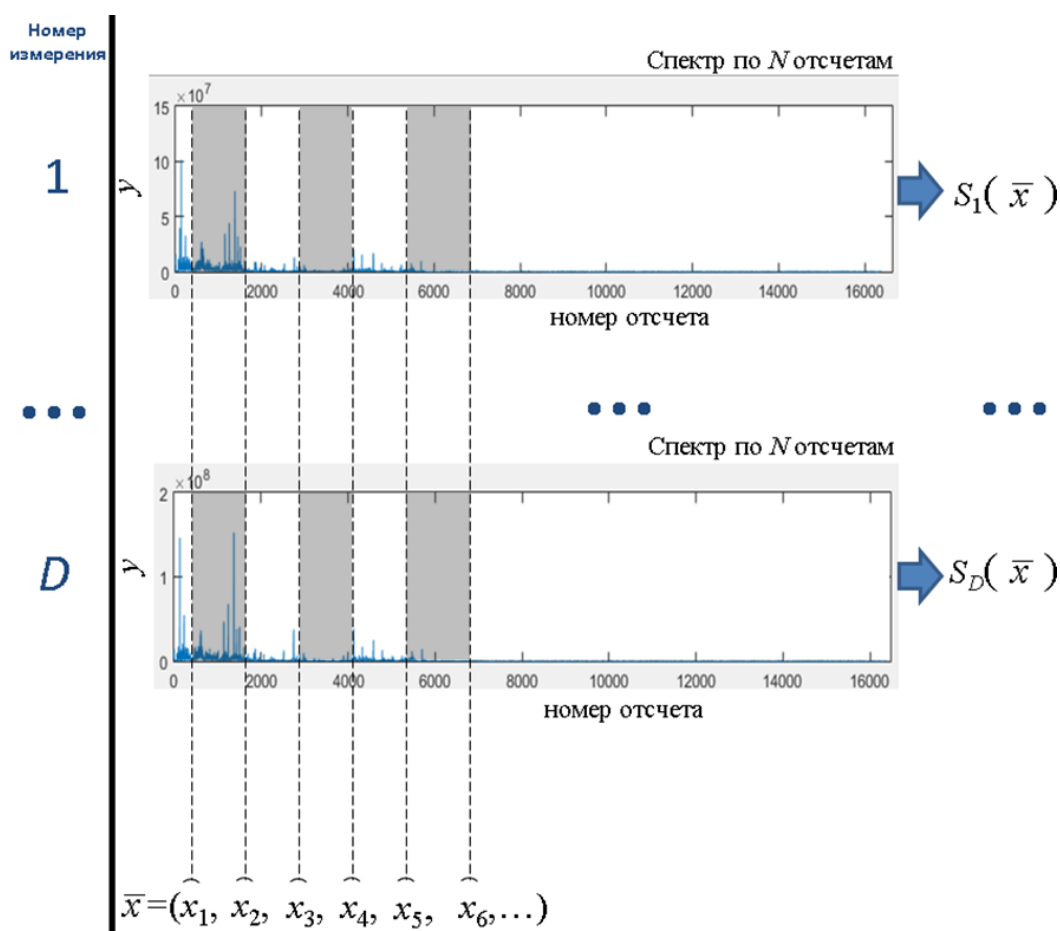


Рис. 2. Построение временной последовательности $S_1(\bar{x}), \dots, S_D(\bar{x})$

В результате суммирования всех амплитуд, попадающих в заштрихованную область (рис. 2), формируется временной ряд – последовательность $S_1(\bar{x}), \dots, S_D(\bar{x})$, которая используется для построения тренда. Для поиска диапазонов интегрирования спектра стационарного сигнала, обеспечивающих максимальные показатели качества этого тренда, предлагаются оптимизационные модели 1-3, описанные ниже.

Применение модели 1 позволяет найти диапазоны интегрирования спектра, обеспечивающие построение на основе $S_1(\bar{x}), \dots, S_D(\bar{x})$ «выраженного» восходящего тренда, характеризующегося высоким уровнем коэффициента детерминации:

Модель 1. Многокритериальная оптимизационная модель.

$$\begin{cases} \max_{\bar{x}} \alpha, \max_{\bar{x}} R^2, \\ \alpha < 90, \end{cases}$$

где \bar{x} – вектор оптимизируемых параметров, содержащий диапазоны интегрирования (номера отсчетов) спектра; α – угол наклона линейного тренда, построенного на основе нормированного временного ряда $S_1(\bar{x}), \dots, S_D(\bar{x})$ (каждый элемент разделен на значение максимального элемента); R^2 – коэффициент детерминации (используется для оценки адекватности модели тренда).

Если известно минимальное допустимое значение α_0 или R_0^2 , то могут соответственно применяться однокритериальные оптимизационные модели 2 и 3, требующие для выполнения оптимизационных расчетов меньших вычислительных затрат по сравнению с моделью 1.

Модель 2. Однокритериальная оптимизационная модель с ограничениями (критерий оптимизации – угол наклона линейного тренда):

$$\begin{cases} \max_x \alpha, \\ \alpha < 90, \\ R^2 > R_0^2, \end{cases}$$

R_0^2 - заданное пороговое значение для R^2 .

Модель 3. Однокритериальная оптимизационная модель (критерий оптимизации – коэффициент детерминации):

$$\begin{cases} \max_x R^2, \\ \alpha_0 \leq \alpha < 90. \end{cases}$$

где α_0 - заданное пороговое значение для α ;

Расчет показателей α и R^2 , используемых в качестве целевых функций и ограничений в оптимизационных моделях 1-3, осуществляется по алгоритму 1.

Алгоритм 1.

Шаг 1. На основе стационарных сигналов $1, \dots, D$ строится временная последовательность сумм амплитуд S_1, \dots, S_D по формуле:

$$S_i(\bar{x}) = y_i(x_1) + \dots + y_i(x_2) + y_i(x_3) + \dots + y_i(x_4) + \dots + y_i(x_{2n-1}) + \dots + y_i(x_{2n}),$$

где $i=1, \dots, D$, $y_i(\bullet)$ – амплитуда i -го спектра, соответствующая спектральному отсчету \bullet , n – количество диапазонов интегрирования спектра.

Шаг 2. Временной ряд $S_1(\bar{x}), \dots, S_D(\bar{x})$ нормируется посредством деления каждого элемента на значение максимального элемента.

Шаг 3. С использованием метода наименьших квадратов осуществляется оценка коэффициентов модели линейного тренда.

Шаг 4. Осуществляется расчет стандартного коэффициента детерминации модели зависимости случайной величины S_i от номера наблюдения i по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{D[S_i|i]}{D[S_i]},$$

где $D[S_i|i]$ – условная дисперсия суммы амплитуд, зависимой от i (дисперсия ошибки модели), $D[S_i]$ – дисперсия суммы амплитуд, как случайной величины.

Шаг 5. Вычисляется α как арктангенс углового коэффициента линейного нормированного тренда.

Конец алгоритма 1.

С использованием оптимизационных моделей 1-3 и реализованных в матлаб генетических алгоритмов [9], обеспечивающих высокую вычислительную эффективность при значительном количестве оптимизируемых параметров, разработаны алгоритмы поиска информативных признаков для прогнозирования технического состояния электромеханического привода. Разработанные алгоритмы исследованы и верифицированы на данных, полученных с использованием математической модели ЭМП и в результате ресурсных стендовых испытаний бесколлекторного электродвигателя беспилотного ЛА (БЛА).

2 Математическая модель ЭМП

На основании проектных характеристик ЭМП БЛА среднего радиуса действия и по результатам его экспериментальных исследований в среде Simulink была разработана математическая модель ЭМП [10]. ЭМП состоит из бесколлекторного электродвигателя, управляющего блока силовой электроники и 6-ступенчатого прямозубого редуктора, интегрированных в один корпус. Характеристики ЭМП представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики ЭМП.

Номинальный момент, Н·м	Максимальный момент, Н·м	Угловая скорость выходного звена при отсутствии нагрузки, °/с	Диапазон отклонения выходного звена, °	Напряжение питания, В	Номинальная потребляемая сила тока, А	Масса, кг
3,5	5	100	±60	27	0,85	0,36

Основное уравнение, определяющее баланс действующих на электродвигатель моментов (рис. 3), выглядит следующим образом [11]:

$$T_{EM} = T_J + T_{Ext} + T_E + T_D,$$

где $T_{EM} = k_t I_s$ – электромагнитный момент, развиваемый на валу ротора, получаемый из произведения коэффициента по моменту k_t и силы тока в фазе статора I_s .

Сила тока в обмотке статора определяется из закона Ома для фазы ротора:

$$\frac{dI_s}{dt} = \frac{U_s - R_s I_s - U_{bemf}}{L_s},$$

где U_s , R_s , L_s – напряжение, сопротивление и индуктивность фазы статора. $U_{bemf} = k_t \omega$ – напряжение противоЭДС, возникающее в обмотках статора при вращении ротора со скоростью ω .

T_{Ext} – внешняя нагрузка (шарнирный момент); T_E – момент упругой деформации редуктора, T_D – диссипативный момент, который используется для установления различных уровней деградаций ЭМП, характеризующихся рассеиванием энергии. Для моделирования диссипативного момента в данной работе используется модель Кулонова трения (рис. 3). Определяемый данным способом диссипативный момент, позволяет оценить порядок обобщенных потерь энергии на трение при отсутствии нагрузки. Более детальное описание модели механического диссипативного момента возможно при моделировании двухмассовой системы «ротор электродвигателя-редуктор» и учета трения Карнопа [12]. Величина ускорения $\dot{\omega}$ определяет инерционный момент $T_J = \dot{\omega} J$ вращающихся узлов СП, где $J = J_{rot} + J_{gear}$, $J_{rot} + J_{gear}$ – моменты инерции ротора электродвигателя и редуктора.

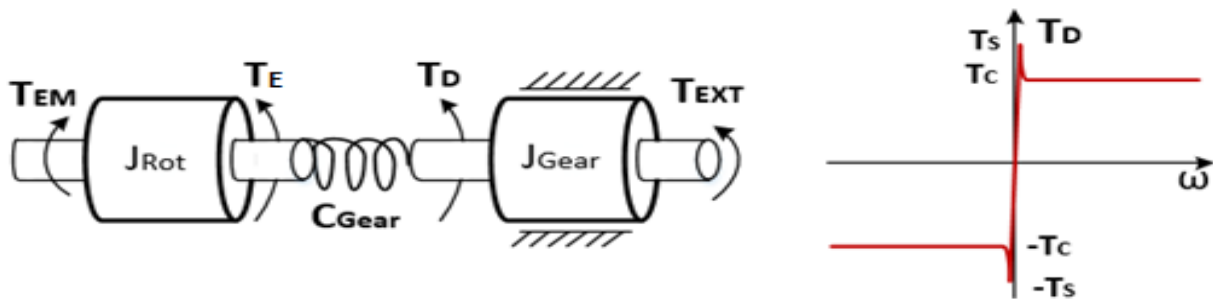


Рис. 3. Кинематическая схема модели механики ЭМП (слева) и характер изменения диссипативного момента (модель Кулонова трения) (справа).

Для проверки алгоритмов диагностики к выходному значению модели трения добавлен псевдослучайный шум.

3 Результаты расчетных исследований

Для исследования разработанных в разделе 1 оптимизационных моделей и алгоритмов с использованием математической модели ЭМП (см. раздел 2) были сформированы данные, включающие измерения тока питания ЭМП БЛА при отработке входного «треугольного» сигнала, представленного на рис. 4.

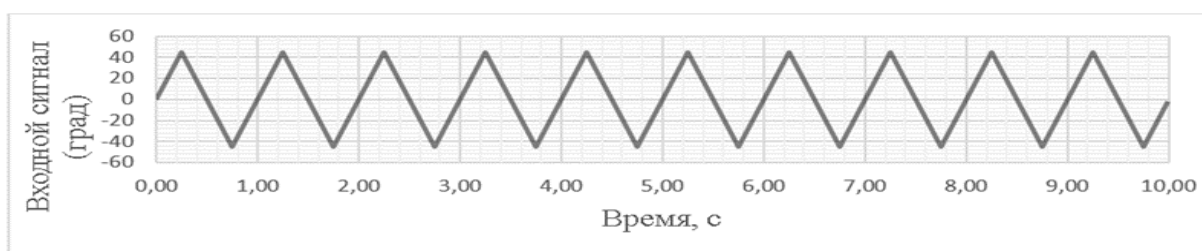


Рис. 4. Входной «треугольный» сигнал математической модели ЭМП

При этом моделирование проводилось D раз и при каждом моделировании $i=1, \dots, D$ с добавлением случайной компоненты увеличивалось значение Кулонова трения T_c (Нм), рост которого обусловлен

развитием деградаций в механической системе ЭМП. На рис. 5 приводится график изменения тока питания во времени, соответствующий входному сигналу, представленному на рис. 4, и $T_c=0.225$.

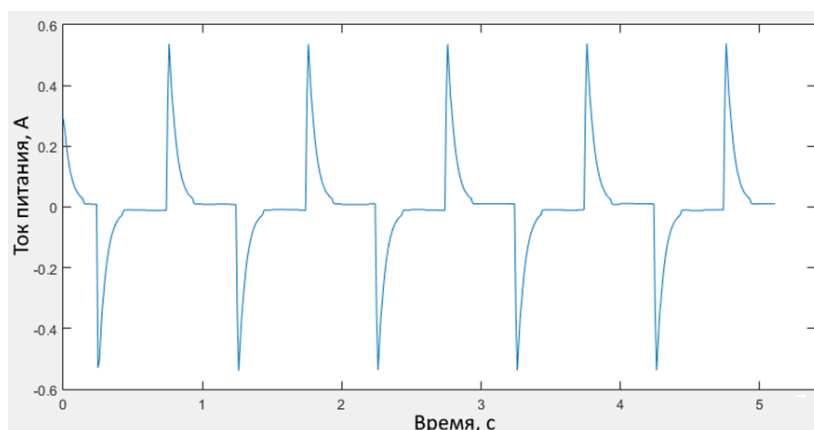


Рис. 5. Изменение тока питания во времени при обработке «треугольного» сигнала

На рис. 6 приводится амплитудный спектр, построенный на основе сигнала тока питания, представленного на рис. 5.

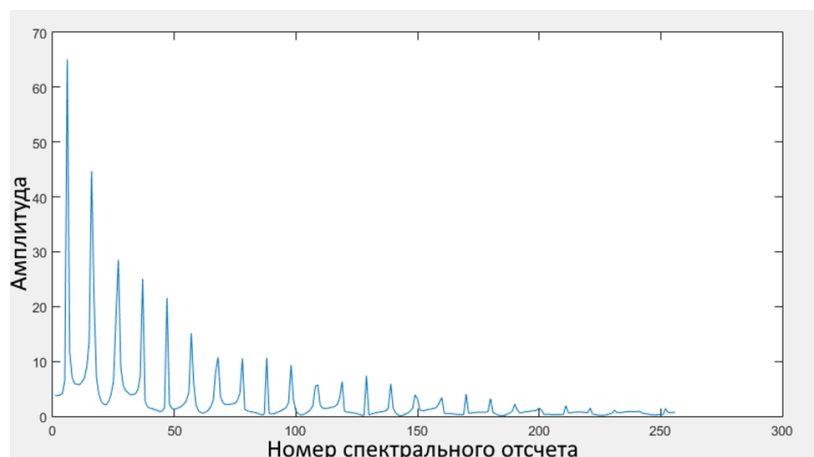


Рис. 6. Амплитудный спектр сигнала тока питания

Рассмотрим применение алгоритмов и моделей, описанных в разделе 2, для анализа данных, полученных при изменении T_c от 0.225 до 1.025 с шагом 0,05 и добавлением случайной компоненты (аддитивного шума).

В результате выполнения оптимизационных расчетов по модели 1 с использованием многокритериального генетического алгоритма (размер популяции – 30000, количество поколений – 50) получен Парето-фронт, фрагмент которого представлен в таблице 2.

Таблица 2. Парето-фронт (оптимизационная модель 1)

x_1	x_2	α	R^2
219	220	0,06353	0,95352
130	130	0,06282	0,95904
177	178	0,07396	0,92831
...
131	131	0,06226	0,97027
219	219	0,06353	0,95352
88	89	0,07347	0,94286

В таблице приводятся диапазоны интегрирования спектра для тока питания и соответствующие им значения целевых функций – коэффициента детерминации R^2 и угла наклона нормированного тренда

а. На рис. 7 представлена динамика изменения суммы амплитуд $S1(\bar{x}), \dots, SD(\bar{x})$ (Data), тренд (Fit), доверительные интервалы (Confidence bounds) для диапазона интегрирования спектра [177; 178].

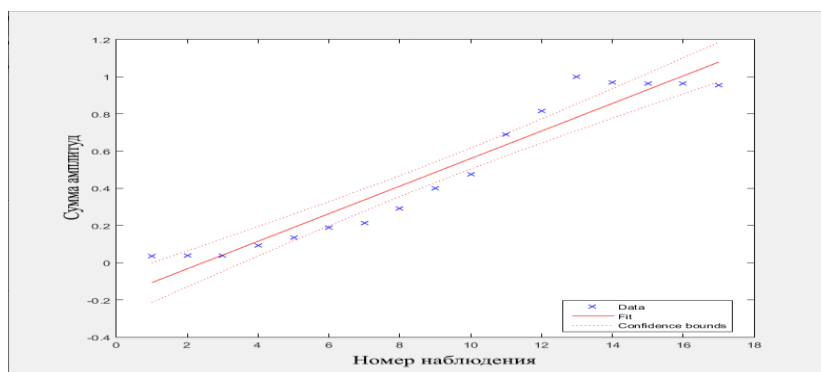


Рис. 7. Тренд для диапазона интегрирования спектра сигнала тока питания [177; 178]

Полученный диапазон интегрирования спектра обеспечивает максимальный угол наклона нормированного тренда и достаточно высокий коэффициент детерминации $R^2=0,928$. На рис. 7 видно, что построенный тренд позволяет экстраполировать значения сумм амплитуд для прогнозирования технического состояния ЭМП.

Применение моделей 2 и 3 позволяет соответственно найти диапазоны [177; 178] и [131; 131], которые являются единственным решением, полученным в результате выполнения оптимизационных расчетов. Данные диапазоны являются достаточно узкими, что объясняется использованием данных, полученных в результате моделирования, а не натуральных измерений.

В связи с этим предложенные оптимизационные модели 1-3 исследовались на данных, полученных в результате ресурсных испытаний электродвигателя, который может использоваться как составная часть ЭМП. Всего в анализе используется 57 записей вибрационного сигнала. На рис. 8 представлена временная последовательность, состоящая из 8192 измерений вибрационного сигнала, характеризующего работу электродвигателя во время первой записи.

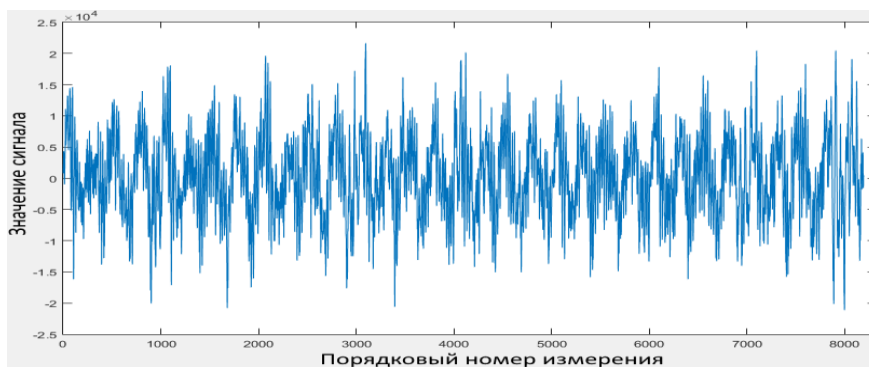


Рис. 8. Вибрационный сигнал (первая запись работы электродвигателя)

На рис. 9 приводится амплитудный спектр вибрационного сигнала, представленного на рис. 8.

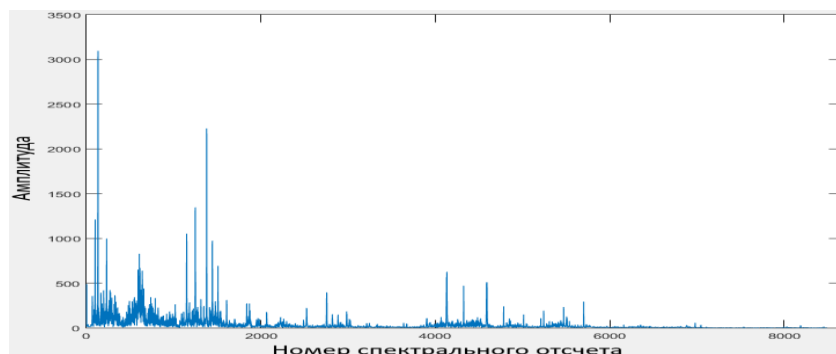


Рис. 9. Амплитудный спектр вибрационного сигнала

В таблице 3 приводится фрагмент Парето-фронта, полученного в результате оптимизационных расчетов по модели 1, при этом вектор решений \bar{x} содержит один диапазон интегрирования спектра вибрационного сигнала.

Таблица 3. Парето-фронт с одним диапазоном интегрирования спектра вибрационного сигнала

x_1	x_2	α	R^2
1351	4137	0,005562	0,66624
1351	4136	0,005564	0,66393
3007	3906	0,006444	0,63194
3067	3907	0,006371	0,65247
3007	3909	0,006427	0,63376
1369	4136	0,005543	0,67334
3069	3906	0,006377	0,65108
...

В таблице 4 приводится фрагмент Парето-фронта, который получен в результате оптимизационных расчетов по модели 1 при использовании трех диапазонов интегрирования спектра вибрационного сигнала.

Таблица 4. Парето-фронт с тремя диапазонами интегрирования спектра вибрационного сигнала

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	α	R^2
3299	3343	3657	2348	3614	3845	0,017055	0,70812
4733	4892	3718	3170	3164	3334	0,009024	0,71604
2923	3171	1332	1424	4493	3263	0,031921	0,46952
3068	3375	4676	4827	4178	3556	0,013	0,71009
2127	2143	6531	2867	2188	987	0,028798	0,57611
3068	3375	4676	4827	4178	3555	0,013	0,70978
3069	3375	4673	4827	4179	3556	0,013002	0,70908
...

Случай, когда элемент вектора \bar{x} с четным номером меньше предыдущего элемента означает, что соответствующий этим элементам диапазон интегрирования спектра при оптимизации был автоматически исключен из вектора решений. Видно, что представленные в таблицах 2 и 3 диапазоны интегрирования шире, чем в таблице 1. При этом увеличение количества диапазонов позволило получить решения с большими значениями α и R^2 .

Применим оптимизационную модель 3, позволяющую получить более точный результат оптимизации с меньшими вычислительными затратами. Время расчета по оптимизационной модели 3 на порядок меньше, чем по оптимизационной модели 1. На рис. 10 представлена динамика изменения суммы амплитуд $S1(\bar{x}), \dots, SD(\bar{x})$ (Data), тренд (Fit), доверительные интервалы (Confidence bounds) для диапазонов интегрирования спектра [3072, 3374], [4772, 4858], [4401, 4431].

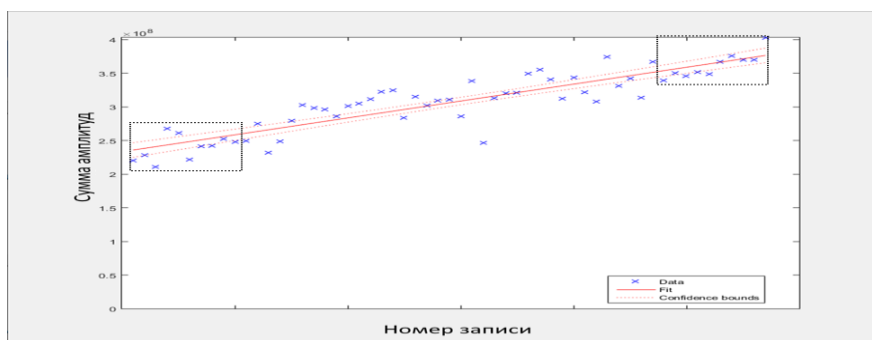


Рис. 10. Тренд для диапазонов интегрирования спектра вибрационного сигнала

[3072, 3374], [4772, 4858], [4401, 4431]

В результате выполнения оптимизационных расчетов по модели 3 были найдены диапазоны интегрирования спектра вибрационного сигнала, обеспечивающие наибольший коэффициент детерминации $R^2=0,8037$.

Заключение

Разработаны оптимизационные алгоритмы поиска информативных признаков для прогнозирования технического состояния ЭМП на основе контролируемых стационарных сигналов. Полученные результаты расчетных исследований показали перспективность и необходимость дальнейших исследований разработанных алгоритмов при стендовых испытаниях ЭМП и вибродиагностике электромеханических систем. Планируется развитие предложенных оптимизационных моделей для поиска информативных признаков с использованием нелинейных трендов.

Литература

1. *Kuvshinov V., Steblinkin A., Erofeev E., Skryabin A.* Safety & energy efficiency research on advanced more electrical flight control actuation systems for short/middle range passenger aircraft // More Electric Aircraft Proceedings. Toulouse, France. 2015. – URL: https://www.see.asso.fr/fichier/20085_safety-energy-efficiency-research-advanced-more-electrical-flight-control-actuation-systems-short-middle-range.
2. *Veresnikov G.S., Skryabin A.V.* The Development of Electromechanical Actuator Mathematical Model for Fault Identification Using Data Mining Methods // Proceedings of the 13th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Moscow, IEEE. 2020. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9247781>.
3. *Lin C., Hsieh Y., Cheng F., Huang H., Adnan M.* Time Series Prediction Algorithm for Intelligent Predictive Maintenance // IEEE Robotics and Automation Letters. № 4. 2019. – P. 2807-2814.
4. *Huang X., Liu J., Niu Y.* Fault Detection of Actuator with Digital Positioner Based on Trend Analysis Method. In Fault Detection. Croatia: InTech. 2010. – 504 p.
5. *Wei Y., Li Y., Xu M., Huang W.* A review of early fault diagnosis approaches and their applications in rotating machinery // Entropy. Vol. 21, №. 4. 2019. – P. 409.
6. *Wescoat E., Mears L., Goodnough J., Sims J.* Frequency Energy Analysis in Detecting Rolling Bearing Faults // Procedia Manufacturing. Vol. 48. 2020. – P. 980-991.
7. *Grzesica D., Wiecek P.* Advanced Forecasting Methods Based on Spectral Analysis // Procedia Engineering. Vol. 161. 2016. – P. 253-258.
8. *Burrus C.S., Frigo M., Johnson G.S.* Fast Fourier Transforms. – United Kingdom: Samurai Media Limited. 2019. – 252 p.
9. *Deb K.* Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms. – John Wiley & Sons. 2001. – 518 p.
10. *Вересников Г.С., Гуцевич Д.С., Скрябин А.В.* Экспериментальное и расчетное исследование сервопривода беспилотных летательных аппаратов для разработки системы диагностики технического состояния // Материалы XII мультikonференции по проблемам управления. Том 4. Ростов-на-Дону Таганрог. – P. 135-138.
11. *Kowalski R., Möller F., Gallun P., Bierig A.* Test facility for electro-mechanical actuation systems // Proceedings of the 7th International Workshop on Aircraft Systems Technologies. Hamburg, Germany. 2019. – P. 133-142.
12. *Bilyaletdinova L., Steblinkin A.* Simulation of direct drive electromechanical actuator with ballscrew // Dynamics and Vibroacoustics of Machine (DVM2016) / Procedia Engineering. Vol. 176. 2017. – P. 85-95.