

DOI:

## **РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ**

**Вересников Г.С.,**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, г. Москва,*

*ул. Профсоюзная д.65*

*veresnikov@ipu.ru*

**Скрябин А.В.**

*Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского,*

*Россия, г. Жуковский, ул. Жуковского д.1*

*aleksey.skryabin@tsagi.ru*

*Аннотация: Предлагается общая схема анализа данных для построения алгоритмов оценки технического состояния электромеханического привода (ЭМП) с использованием методов интеллектуального анализа данных (ИАД). Рассматривается модель ЭМП, которую предлагается использовать для оценки технического состояния ЭМП и формирования базы прецедентов для применения методов ИАД.*

*Ключевые слова: ранняя диагностика, интеллектуальный анализ данных, неисправность, электромеханический привод.*

### **Введение**

Разработки, проводимые в области создания электрического летательного аппарата (ЛА), используют технологию электромеханического привода (ЭМП) для отклонения рулевой поверхности первичной системы управления полетом. Необходимость повышения показателей безопасности полета летательных аппаратов и снижения сервисных затрат обуславливают актуальность разработки и внедрения систем контроля технического состояния (СКТС) ЭМП.

Исследования СКТС ЭМП проводятся ведущими авиационными конструкторскими бюро (Airbus, Boeing, Sikorsky и др.), исследовательскими организациями (CESA, DLR, INSA, NASA, TsAGI и др.) и разработчиками систем управления полетом (Liebherr, Moog, Parker и др.) [1-3].

Существующие прототипы подобных систем [4-5] показали эффективность интеграции алгоритмов интеллектуального анализа данных (ИАД) и метода сравнения функционирования сигналов натурной системы с математической моделью для решения задачи оценки технического состояния ЭМП (классификации нормального состояния и различных нештатных состояний).

Следует отметить, что в зависимости от цели использования математической модели требуется различный уровень ее детализации, определяющий точность моделирования различных физических процессов. Для моделирования динамики замкнутого контура «ЛА - система управления – рулевой ЭМП» требуется обеспечить соответствие качества регулирования (под нагрузкой и без нее) при отклонении выходного звена рулевого привода. При этом, как правило, необходимо обеспечить расчет модели с шагом решения в диапазоне  $0,01 \div 0,001$  с.

Моделирование большинства видов деградаций в подсистемах ЭМП предполагает более детализированный учет параметров, определяющих преобразование энергии в ЭМП. В особенности это касается таких физических явлений, как процессы изменения токов при переключении полупроводниковых элементов и протекании через обмотки статора ЭД, а также моделирования упругих деформаций редуктора (модель люфта), что требует меньших шагов интегрирования ( $10^{-6}$  с, и менее при моделировании силовой электроники).

Таким образом, математическая модель может использоваться как для мониторинга состояния реальной системы (сравнения выходных сигналов модели и натурной системы), так и для получения массива данных, необходимых для исследования и разработки алгоритмической основы системы ранней диагностики ЭМП с использованием методов ИАД. В методах ИАД логической единицей, используемой при построении и изменении моделей, определяющих зависимости между контролируемыми параметрами и состоянием ЭМП, является прецедент. Прецедент является отражением знания о ранее возникавших ситуациях или случаях. Применение такого подхода к построению алгоритмов идентификации технического состояния ЭМП позволяет использовать данные, которые являются ценным источником информации о накопленном в процессе испытаний и эксплуатации опыте.

Применение методов ИАД позволяет решать задачу контроля технического состояния ЭМП, когда отсутствуют достаточное количество данных для принятия статистических гипотез с необходимым уровнем доверия и подробные математические описания физических процессов развития деградаций в условиях воздействия всевозможных внутренних и внешних факторов.

## 1 Определение параметров ЭМП и разработка математической модели

Для исследования возможностей применения алгоритмов диагностики технического состояния была разработана математическая модель ЭМП БЛА взлетным весом 400 кг. с прямым зубым редуктором. В приводе используется блочный (трапецевидный) алгоритм коммутации обмоток (рисунок 1). ЭМП состоит из бесколлекторного электродвигателя (ЭД), управляющего блока силовой электроники и 6-ступенчатого прямого зубого редуктора. Коммутация обмоток осуществляется по сигналу датчика Холла, установленного на валу ротора. Подобный алгоритм характеризуется простотой реализации и позволяет ограничить количество используемой элементной базы.

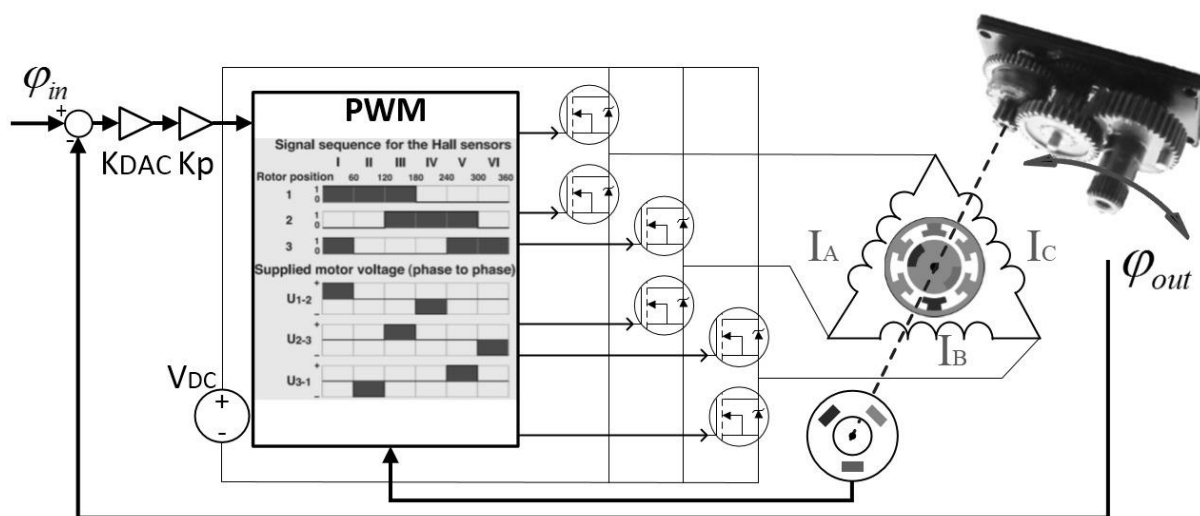


Рис. 1. Функциональная схема ЭМП ( $\varphi_{in}$  – входной сигнал управления положением вала  $\varphi_{out}$  – сигнал датчика обратной связи выходного вала,  $V_{DC}$  – источник питания постоянного тока,  $I_A, I_B, I_C$  – токи в обмотках электродвигателя,  $K_{DAC}, K_p$  – коэффициенты усиления)

Разработанная математическая модель обладает низким уровнем детализации и учитывает такие эффекты, как: зона нечувствительности (квантование сигналов и упрощенная модель люфта), сухое трение, физические ограничения по току и напряжению электропитания. Для оценки корректности реализованной математической модели были проведены эксперименты с натурным образцом сервопривода.

### 1.1 Валидация

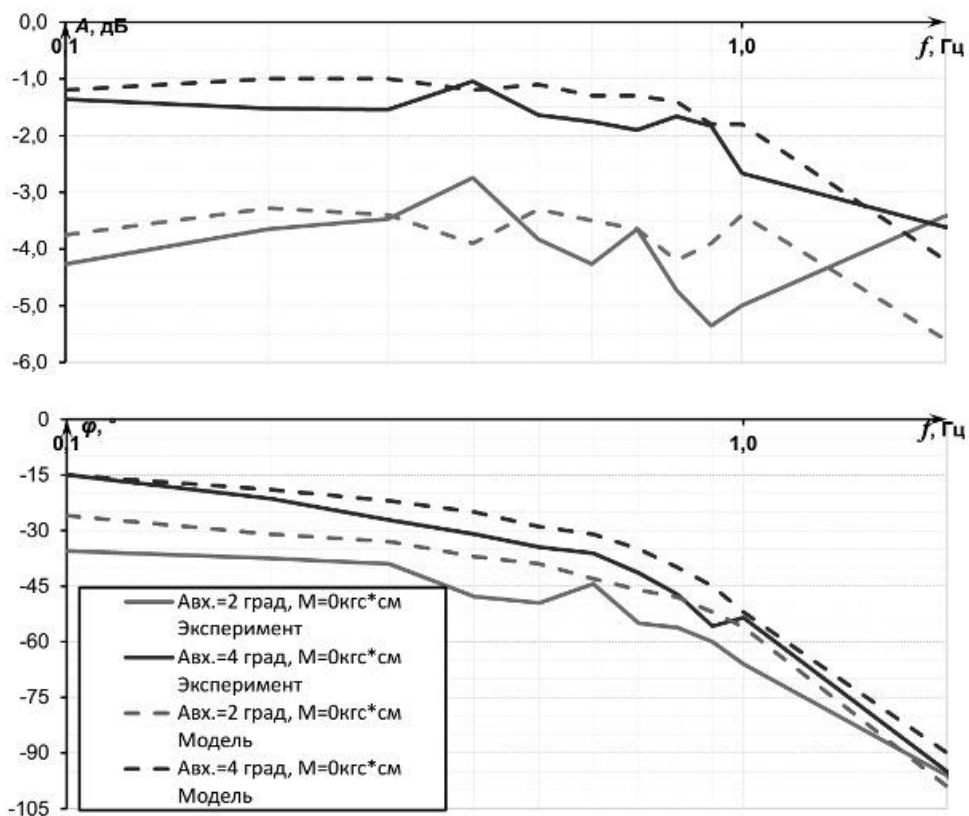
Одним из важнейших критериев качества работы системы ранней диагностики в ходе эксплуатации является ее адекватность, т.е. соответствие найденных закономерностей объекту диагностики [6]. Адекватность в значительной мере зависит от информативности («качества») данных, которые являются основой применения алгоритмов ИАД. На начальном этапе создания системы ранней диагностики в качестве исходных данных для обучения и тестирования алгоритмов ИАД целесообразно использовать результаты математического моделирования. В дальнейшем предполагается комбинирование результатов математического моделирования и данных, полученных в ходе отработки натурального образца.

Процесс создания математической модели должен сопровождать процесс разработки и эксплуатации ЭМП. Данные, полученные в ходе отработки уточненной и высокодетализированной математической модели, взаимно дополняют эксплуатационные данные и снижают вероятность неправильной идентификации (ошибки) технического состояния ЭМП. Поэтому должно обеспечиваться максимальное соответствие математической модели натурному ЭМП при аналогичных условиях функционирования.

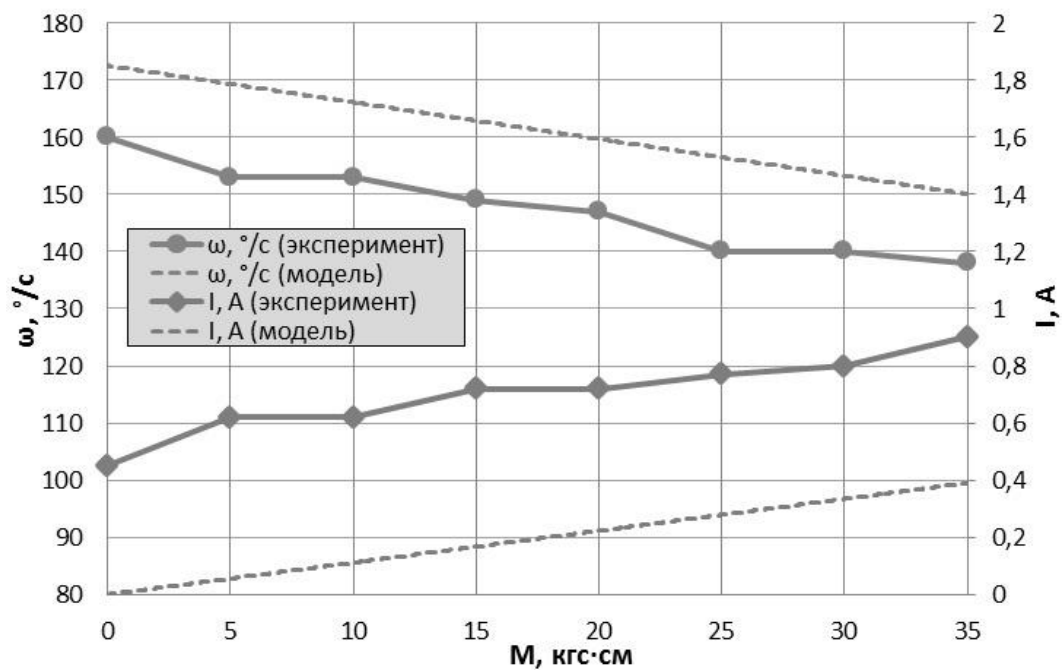
Валидация разработанной математической модели ЭМП проводилась на основании методов, представленных в [7], основные характеристики, полученные в ходе автономной отработки, показаны на рисунке 2. Характеристики динамики, точность позиционирования и скорость соответствуют

экспериментальным с точностью не менее 10%, что позволяет использовать модель в контуре системы управления ЛА.

а)



б)



в)

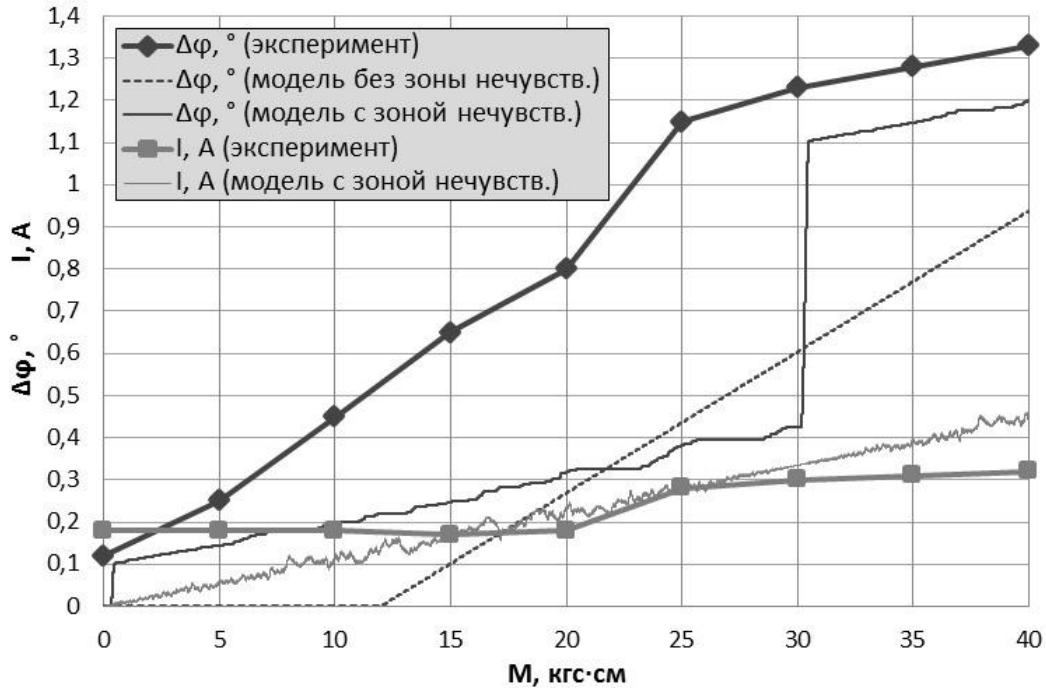


Рис. 2. Сравнение расчетных (пунктир) и экспериментальных (сплошная линия) характеристик: а) Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики; б) Механическая характеристика; в) Статическая жесткость. (А – искажение по амплитуде выходного сигнала относительно входного сигнала, φ – фазовое запаздывание, f - частота, Авх. – входной управляющий сигнал, М – внешняя нагрузка, ω – угловая скорость поворота вала, I – потребляемый ток, Δφ – просадка вала под нагрузкой)

Различия в характеристиках статической жесткости и потребляемого тока, определяющего входную мощность, вызваны пренебрежением потерями энергии. Поэтому для уточнения модели в части потерь на трение был также измерен обобщенный диссипативный момент при выбеге ротора.

## 1.2 Определение обобщенного диссипативного момента

При задании входного сигнала привода, соответствующего максимальному значению сигнала рассогласования, вал привода разгоняется и при достижении максимальной скорости осуществляется отключение силового электропитания (рисунок 3). Величина ускорения  $\varepsilon$  определяет инерционный момент  $T_J$  вращающихся узлов СП, который, в свою очередь, по абсолютному значению равен диссипативному моменту  $T_D$ . Уравнение баланса моментов, действующих на электродвигатель при выбеге, выглядит следующим образом:

$$(1) \quad \vec{T}_{EM}^0 = \vec{T}_{Ext}^0 + T_J + T_D + \vec{T}_C^0,$$

где  $T_{EM}$  – электромагнитный момент;  $T_{Ext}$  – внешняя нагрузка;  $T_C$  – упругая деформация редуктора.

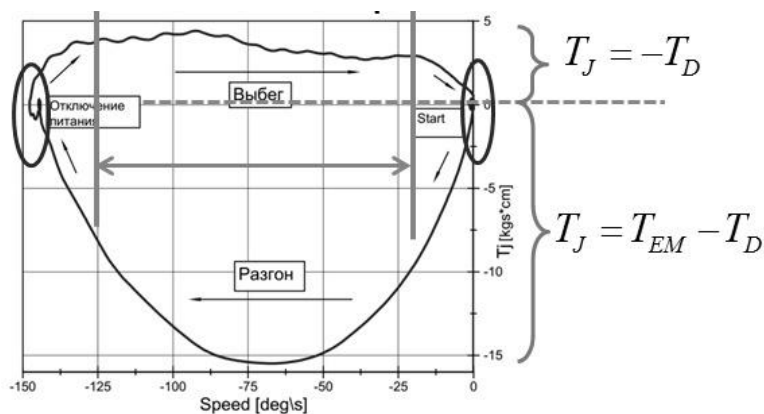
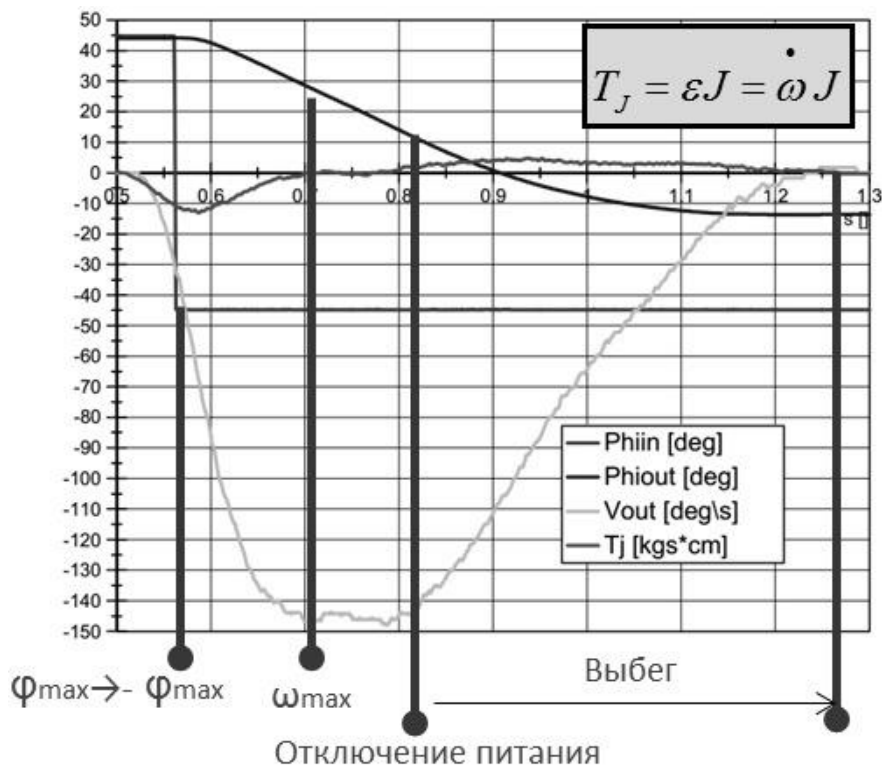


Рис. 3. Определение инерционного момента ротора и редуктора на выбеге ( $\varepsilon$  – угловое ускорение выходного вала,  $J$  – момент инерции редуктора и ротора, приведенный к выходному валу,  $\omega$  – угловая скорость выходного вала,  $\varphi_{\max}$  – максимальный угол поворота вала,  $\omega_{\max}$  – максимальная угловая скорость выходного вала,  $\Phi_{i\text{in}}$  – входной сигнал управления поворотом вала,  $\Phi_{i\text{out}}$  – выходной сигнал поворота вала,  $V_{\text{out}}$  – выходная угловая скорость,  $T_j$  – инерционный момент,  $T_{EM}$  – электромагнитный момент двигателя,  $T_D$  – диссипативный момент)

Определяемый данным способом диссипативный момент позволяет оценить порядок обобщенных потерь энергии на трение при отсутствии нагрузки. Данный способ не позволяет оценить момент страгивания, измерение которого требует измерения активного тока в обмотках статора при воспроизведении квазистатических сигналов различной скорости.

## 2 Схема анализа данных для построения алгоритма оценки технического состояния

Задача построения алгоритма оценки технического состояния ЭМП с использованием методов ИАД может быть сформулирована в рамках проблемы классификации следующим образом (рисунок 4). На основе известного конечного множества описаний состояния ЭМП  $\{(\bar{x}_1, \bar{y}_1), \dots, (\bar{x}_k, \bar{y}_k)\}$ ,  $\bar{x}_i \in X$ ,  $\bar{y}_i \in Y$ ,  $i=1..k$  требуется построить алгоритм оценки состояния ЭМП  $\Phi: X \rightarrow Y$ , позволяющий для произвольного вектора  $\bar{x} \in X$  получить вектор  $\bar{y} \in Y$ , где  $X$  – множество векторов значений контролируемых параметров ЭМП (признаков),  $Y$  – множество меток классов,

отражающих агрегированные состояния ЭМП, в отношении которых могут приниматься одинаковые решения.

В общем случае  $X = R^{n \times q}$ ,  $Y = R^m$ , где  $n$  – количество контролируемых параметров ЭМП;  $q$  – количество последовательных моментов времени, в которые рассматриваются значения контролируемых параметров ЭМП;  $m$  – количество вещественных чисел, необходимое для представления меток классов, соответствующих агрегированным состояниям ЭМП.

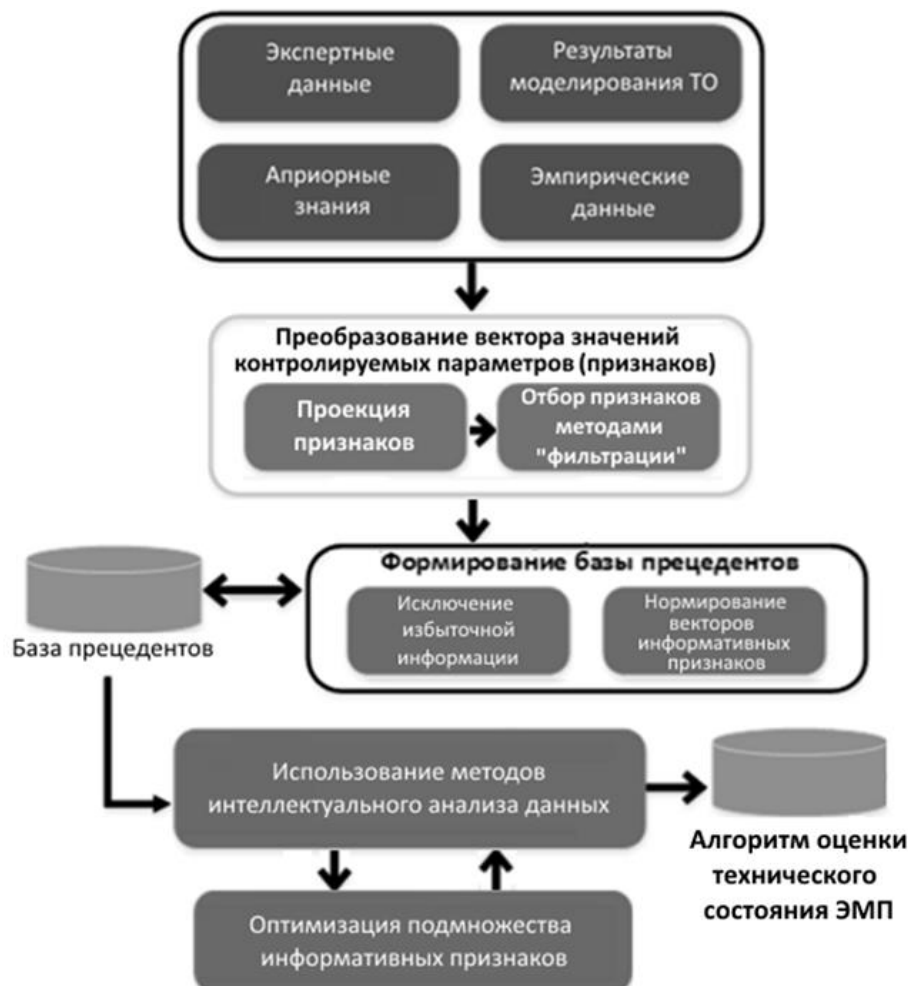


Рис. 4. Схема анализа данных для построения алгоритма оценки технического состояния ЭМП

В рамках этой схемы для успешного применения методов ИАД требуется сформировать базу прецедентов, наиболее полно отражающую взаимосвязи между параметрами и оценкой состояния ЭМП. Предполагается формировать базу прецедентов на основе эмпирических данных, экспертных данных, результатов моделирования ЭМП, априорной информации.

Алгоритм  $\Phi$  реализуется в виде совокупности двух последовательно выполняющихся алгоритмов:  $\Omega$  - выделения информативных признаков и  $\Lambda$  - классификации состояний ЭМП на основе выделенных информативных признаков. Такой подход обусловлен тем, что наличие предварительно найденных информативных признаков позволяет во многих случаях значительно повысить эффективность применения методов ИАД.

В результате выбора методов проекции признаков формируется алгоритм выделения информативных признаков  $\Omega: X \rightarrow H$ , где  $H$  - множество векторов информативных признаков. В рамках схемы на рисунке 4 алгоритм  $\Omega$  применяется, чтобы множество состояний ЭМП  $\{(\bar{x}_1, \bar{y}_1), \dots, (\bar{x}_k, \bar{y}_k)\}$ ,  $\bar{x}_i \in X$ ,  $\bar{y}_i \in Y$ ,  $i=1..k$  преобразовать в множество  $\{(\bar{h}_1, \bar{y}_1), \dots, (\bar{h}_k, \bar{y}_k)\}$ ,  $\bar{h}_i \in H$ ,  $\bar{y}_i \in Y$ ,  $i=1..k$ , которое является входной информацией для методов ИАД. В качестве методов проекции контролируемых параметров предлагается использовать методы, позволяющие учитывать особенности функционирования ЭМП (расчет производных и интегральных параметров, спектральный анализ) и методы проекции общего назначения (для линейных преобразований - метод

главных компонент, для нелинейных преобразований - ядерный метод главных компонент и специальный вид нейронных сетей «автокодировщик») [8].

После проекции контролируемых параметров используются методы отбора - «фильтрации» признаков (например, t-тест, хи-квадрат-тест) [9]. В результате применения этих методов сокращается количество элементов вектора  $\bar{h}$ .

Далее с использованием выбранного разработчиком метода ИАД выполняется поиск и формализация закономерностей (строится алгоритм классификации состояний ЭМП на основе информативных признаков  $\Lambda: H \rightarrow Y$ ), содержащихся в базе прецедентов, в интеграции с методом, выполняющим оптимизацию подмножества информативных признаков (wrapper methods [10]), что позволяет дополнительно сократить количество элементов вектора  $\bar{h}$  и повысить точность алгоритма  $\Lambda$ .

После того как алгоритм  $\Phi$  построен, он применяется, чтобы для произвольного вектора  $\bar{x} \in X$  (значений контролируемых параметров) получить вектор  $\bar{y} \in Y$  (оценку технического состояния ЭМП). Также алгоритм  $\Phi$  применяется в интеграции с методами прогнозирования на основе анализа временных рядов для получения прогноза технического состояния ЭМП (рисунок 5).



Рис. 5. Схема анализа данных в режиме использования алгоритма оценки технического состояния ЭМП

Исходными данными для прогнозирования информативных признаков является ретроспективная информация о динамике изменений входных параметров алгоритма  $\Lambda$ . Это означает, что для каждого  $i$ -го входного параметра алгоритма  $\Lambda$  на вход алгоритма прогнозирования подается последовательность  $h_{i,t-r}, \dots, h_{i,t}$  ( $r$  – глубина ретроспекции) и в результате его выполнения формируются оценки  $\hat{h}_{i,t+1}, \dots, \hat{h}_{i,t+p}$  для неизвестных значений  $h_{i,t+1}, \dots, h_{i,t+p}$  ( $p$  – горизонт прогнозирования). Далее на вход алгоритма  $\Lambda$  подаются вектора, которые содержат прогноз информативных признаков:  $(\hat{h}_{1,t+1}, \dots, \hat{h}_{z,t+1}), \dots, (\hat{h}_{1,t+p}, \dots, \hat{h}_{z,t+p})$ , где  $z$  – количество информативных признаков. В результате формируется оценка ожидаемого состояния ЭМП  $\bar{y}_{t+1}, \dots, \bar{y}_{t+p}$  в моменты

времени  $t+1, \dots, p$ . Таким образом, на выходе схемы, представленной на рисунке 5, будет получена оценка и прогноз состояния ЭМП.

Подобные схемы могут использоваться для диагностики привода, функционирующего в полете (рисунок 6), когда рулевая поверхность должна отклоняться с различными скоростями и при нагружении недетерминированным шарнирным моментом.

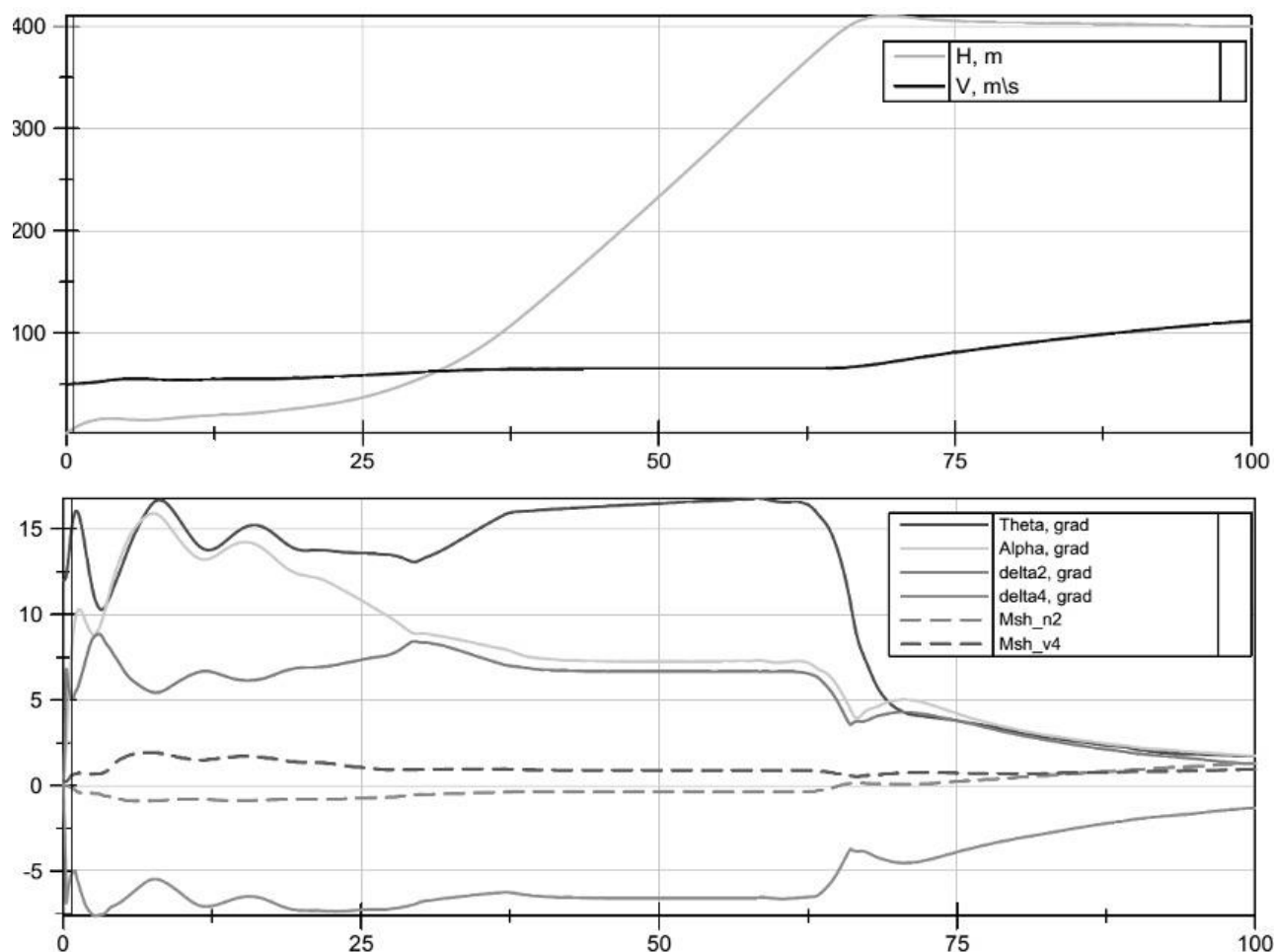


Рис. 6. Пример моделирования полетной циклограммы полета БЛА взлетным весом 400 кг ( $H$  – высота,  $V$  – скорость полета,  $\Theta$  – угол тангажа,  $\alpha$  – угол атаки,  $\delta_2$  и  $\delta_4$  – углы отклонения рулевых поверхностей,  $M_{sh\_n2}$  и  $M_{sh\_v4}$  – шарнирные моменты рулевых поверхностей)

Подавая полученные сигналы полетной циклограммы (командный сигнал отклонения руля и шарнирный момент) в качестве входных сигналов на разработанную ранее модель привода (рисунок 7) можно увидеть, что точность отработки заданного сигнала поворота вала при наличии шарнирной нагрузки и сухого трения составляет не менее  $0,5^\circ$ , что позволяет обеспечить управление ЛА, но в то же время свидетельствует о том, что потери энергии при незначительном росте потерь энергии на трение в ходе развития деградаций могут оставаться невыявленными. Для идентификации технических состояний ЭМП, в которых развиваются неисправности и предлагается использовать схемы анализа данных представленные выше.



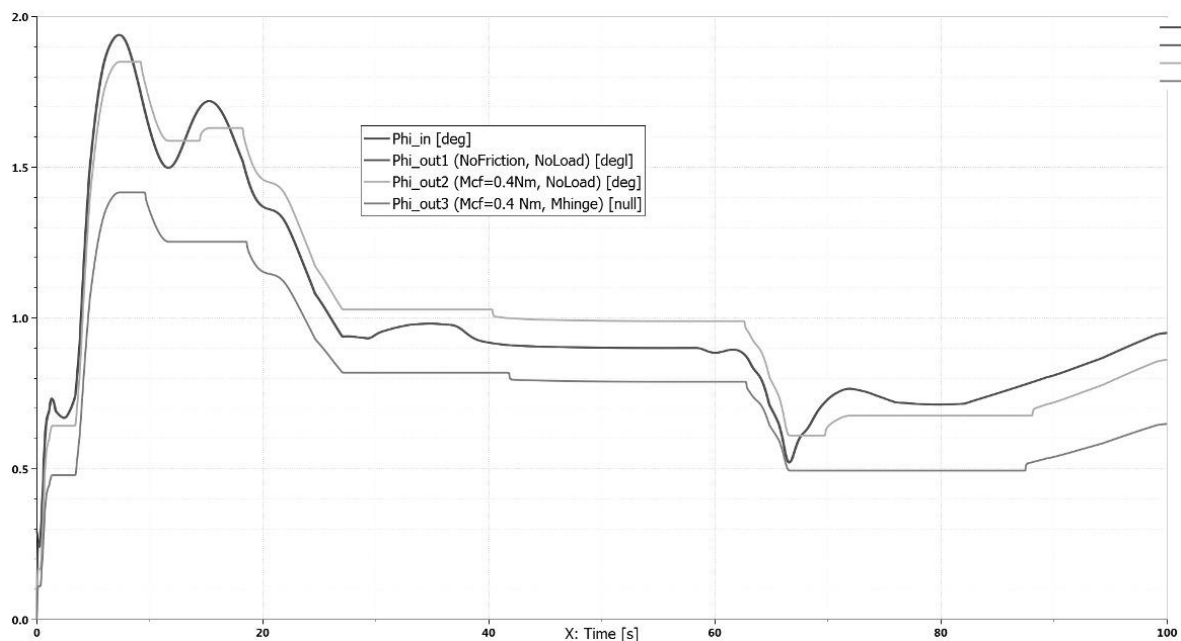


Рис. 7. Выходные сигналы поворота вала модели привода с учетом наличия сухого трения и нагрузки при воспроизведении полетной циклограммы ( $\Phi_{in}$  – входной сигнал отклонения рулевой поверхности,  $\Phi_{out1}$  – выходной сигнал отклонения рулевой поверхности без учета трения,  $\Phi_{out2}$  и  $\Phi_{out3}$  – выходные сигналы отклонения рулевой поверхности при моменте сухого трения  $M_{cf}=0,4$  Нм без нагрузки и под действием шарнирного момента)

## Заключение

В результате проведенных исследований была создана математическая модель сервопривода с прямым редуктором, учитывающая сухое трение и соответствующая натурному образцу с точностью 10%. Предложена и рассмотрена схема анализа данных при функционировании привода на недетерминированных режимах.

Для адекватного определения технического состояния ЭМП актуальной является задача анализа данных функционирования привода в различных режимах. Соответственно, необходимо валидировать алгоритмы идентификации технического состояния ЭМП, созданные с использованием ИАД, посредством проверки информации о всех состояниях (образах) работы привода. При этом следует учитывать многомерность анализируемых данных, обусловленную по крайней мере такими факторами, как: различные скорости и внешние нагрузки вала привода, температурный режим и разный уровень деградации (потерь энергии) подсистем ЭМП. Для снижения размерности исходных данных формируются информативные признаки, содержащие наиболее ценную информацию о техническом состоянии ЭМП.

## Литература

1. Glison E., Kopp J.D., Manzanares D. MOOG next generation control and actuation // Proceedings 6th International Conference on Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components (R3ASC 2014). Toulouse. France. 2014. – P. 43-54.
2. 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,
3. Van Der Linden F, Dreyer N, Dorkel A. EMA Health monitoring: an overview // Proceedings 7th International Conference on Recent Advances Aerospace Actuation Systems and Components (R3ASC 2016). Toulouse. France. 2016. – P. 21-26.
4. Balaban E. et. al. Prognostic Health-Management System Development for Electromechanical Actuators // Journal of Aerospace Information Systems. Vol. 12, № 3, 2015. – P. 329-344.
5. Dalla Vedova M.D.L., Berri P.C. Optimization techniques for prognostics of on-board electromechanical servomechanisms affected by progressive faults // International Review of Aerospace Engineering (I.RE.AS.E). Vol. 12, № 4. 2019. – P. 160-170.

6. *Veresnikov G., Skryabin A.* The development of data mining methods criteria to identify failures of aircraft control surface actuator // *Procedia Computer Science*. Vol. 112. 2017. – P. 1007–1014.
7. *Erofeev E., Skryabin A., Steblinkin A., Khaletskiy L.* Methodologies and test-rig configurations for the experimental improvement of flight control actuation systems // *Proceedings 8th International Conference on Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Component (R3ASC 2018)*. Toulouse. France. 2018. – P. 109-115.
8. *Bengio Y. et al.* Representation Learning: A Review and New Perspectives // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 35 (8). 2013. – P. 1798-1828.
9. *Chuang L.-Y., Ke C.-H., Yang C.-H.* A Hybrid Both Filter and Wrapper Feature Selection Method for Microarray Classification // *Proceedings of International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*. 2008. – P. 146-150.
10. *Soufan O., Kleftogiannis D., Kalnis P., Bajic V.B.* DWFS: A wrapper feature selection tool based on a parallel genetic algorithm *PLoS ONE*. Vol. 10(2). 2015. – URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0117988>.