КОМПЛЕКСНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КАБЕЛЬНОЙ МАШИНЫ В СТРУКТУРЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Иванова Вера Павловна
Цыпкина Виктория Вячеславовна
Пирназарова Сарбиназ Сарсенбаевна
Аминов Руслан Дмитриевич

Аннотация. *В статье рассматривается задача разработки математической модели цифрового двойника кабельной машины общего типа, предназначенной для повышения эффективности управления технологическими процессами кабельного производства. Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от традиционных систем управления к интеллектуальным киберфизическим системам, обеспечивающим мониторинг, диагностику и прогнозирование состояния оборудования в режиме реального времени.*

Предложенный подход основан на построении комплексной математической модели, объединяющей электромеханические и технологические подсистемы кабельной машины. Разработаны модели электропривода, учитывающие электрические и механические процессы асинхронного двигателя с частотным регулированием, а также модель механической части, описывающая динамику движения кабеля, изменение натяжения и влияние переменного радиуса намотки.

Особое внимание уделено формированию структуры цифрового двойника, включающей физический объект, систему датчиков, подсистему сбора и обработки данных, математическую модель, блок идентификации параметров, аналитический модуль и модуль прогнозирования. Показано, что реализация замкнутого информационного контура позволяет обеспечить адаптацию модели к изменяющимся условиям эксплуатации и учитывать влияние износа оборудования и внешних возмущений.

Разработан алгоритм функционирования цифрового двойника, включающий этапы сбора данных, предварительной обработки, расчета состояния системы, сравнения модельных и измеренных параметров, идентификации, диагностики и оптимизации режимов работы. Установлено, что применение цифрового двойника позволяет повысить точность оценки технологических параметров, снизить энергопотребление, уменьшить вероятность перегрузочных режимов и повысить стабильность работы кабельной машины.

Полученные результаты формируют научно-методическую основу для внедрения цифровых двойников в кабельную промышленность и создания интеллектуальных систем управления электромеханическими комплексами.

Ключевые слова: *цифровой двойник, кабельная машина, математическое моделирование, электропривод, механическая система, частотное регулирование, натяжение кабеля, киберфизическая система, оптимизация режимов, диагностика оборудования, промышленная автоматизация, энергоэффективность.*

Введение. Развитие кабельной промышленности и повышение требований к качеству продукции обуславливают необходимость перехода к интеллектуальным методам управления технологическим оборудованием. Одним из наиболее перспективных направлений является применение концепции цифровых двойников (ЦД), позволяющей объединить физический объект и его математическую модель в единую информационно-управляющую систему.

Кабельная машина (КМ) как объект управления представляет собой сложную электромеханическую систему (ЭМС), включающую электропривод, механические передачи, узлы натяжения и технологические исполнительные механизмы. В процессе эксплуатации параметры системы изменяются под воздействием переменных нагрузок, износа оборудования и нестабильности технологических режимов.

Это делает невозможным эффективное управление КМ на основе статических моделей и требует разработки динамических математических моделей, способных работать в режиме реального времени.

Разработка ЦД КМ общего типа предполагает создание математической модели, способной адекватно описывать физические процессы, протекающие в оборудовании, и обеспечивать возможность анализа и прогнозирования его режимов работы. В рамках концепции цифровых двойников такая модель должна объединять описание механических, электрических и технологических подсистем объекта, а также учитывать влияние эксплуатационных факторов.

КМ как объект моделирования представляет собой сложную ЭМС, включающую приводные механизмы, систему натяжения кабеля, направляющие элементы и исполнительные узлы намотки или скрутки. В процессе эксплуатации основные параметры системы изменяются во времени, что обусловлено переменными нагрузками, изменением скорости движения кабеля, динамикой натяжения, а также возможным износом элементов конструкции.

Постановка задачи математического моделирования цифрового двойника. Разработка цифрового двойника кабельной машины общего типа предполагает создание комплексной математической модели, описывающей взаимосвязанные механические, электрические и технологические процессы.

Целью математического моделирования является получение зависимостей, позволяющих:

описывать динамику работы КМ в различных режимах;

- выполнять анализ текущего состояния оборудования;
- прогнозировать поведение системы;
- формировать основу для интеллектуального управления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. разработать математическую модель механической части КМ с учетом динамики движения кабеля;
2. сформировать модель электропривода с учетом частотного регулирования;
3. описать процесс формирования и стабилизации натяжения кабеля;
4. определить входные и выходные параметры системы;
5. установить функциональные зависимости между скоростью, нагрузкой и энергопотреблением;
6. обеспечить адаптацию модели к изменяющимся условиям эксплуатации;
7. сформировать структуру интеграции модели в цифровой двойник.

Особое значение имеет баланс между точностью модели и вычислительной эффективностью, поскольку цифровой двойник должен функционировать в режиме, близком к реальному времени.

Структурная схема цифрового двойника кабельной машины. Структура цифрового двойника КМ представляет собой многоуровневую систему, включающую физический объект, систему измерений, математическую модель и блоки анализа и управления, представленную на рис.1, как Блок схему.

Цифровой двойник включает два контура:

Физический контур — реальная кабельная машина;

Цифровой контур — математическая модель и вычислительные алгоритмы.



Рис. 1. Блок-схема структурная схема ЦД

Информационное взаимодействие осуществляется через систему датчиков, фиксирующих:

- скорость вращения приводов;
- натяжение кабеля;
- электрические параметры двигателя;
- температурные и вибрационные характеристики.

Основные компоненты ЦД:

1. физический объект (КМ);
2. система датчиков;
3. система сбора данных;
4. математическая модель;
5. блок идентификации параметров;
6. аналитический модуль;
7. модуль прогнозирования;
8. блок оптимизации управления.

Все элементы образуют замкнутый контур обратной связи.

Таким образом, предложенная структурная схема (рис.1) обеспечивает интеграцию физического объекта и цифровой модели в единую информационно-управляющую систему, позволяющую осуществлять мониторинг, диагностику и оптимизацию работы кабельной машины общего типа в режиме реального времени.

Математическое моделирование. Электропривод является основным энергетическим звеном КМ, определяющим динамику движения и стабильность технологического процесса.

Электрическая модель двигателя.

Математическое описание:

$$u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt}$$

$$u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} \quad (1)$$

где, U_s — напряжение статора, R_s — активное сопротивление обмотки статора, i_s — ток статора, Ψ_s — потокосцепление статора.

Потокосцепления связаны с токами ротора и статора через индуктивности, что позволяет описывать электромагнитные процессы в двигателе.

Механическая модель электропривода определяется динамикой системы:

$$M = M_c + M_{\text{дин}} \quad (2)$$

где: M — электромагнитный (движущий) момент двигателя; M_c — статический момент сопротивления исполнительного органа (полезная нагрузка, трение); $M_{дин}$ — динамический момент, необходимый для изменения скорости вращения.

Момент сопротивления в кабельной машине (рис.2) определяется технологической нагрузкой, связанной с натяжением кабеля и трением в механических элементах.

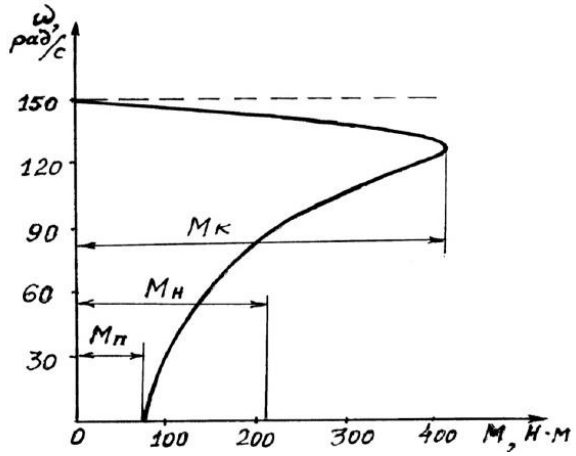


Рис. 2. Механическая характеристика электропривода -зависимость скорости от момента ω = f(M)

Модель электромагнитного момента. Электромагнитный момент асинхронного двигателя (рис.3) определяется результатами оценки и построения графика электромагнитного момента (M) используют упрощенную формулу Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{max}}{\frac{s}{s_{max}} + \frac{s_{max}}{s}} \quad (3)$$

где: M_{max} — критический (максимальный) момент, который способен развить двигатель, s — скольжение,

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (4)$$

где, n_1 — скорость магнитного поля, n — скорость ротора), s_{max} — критическое скольжение, при котором возникает максимальный момент.

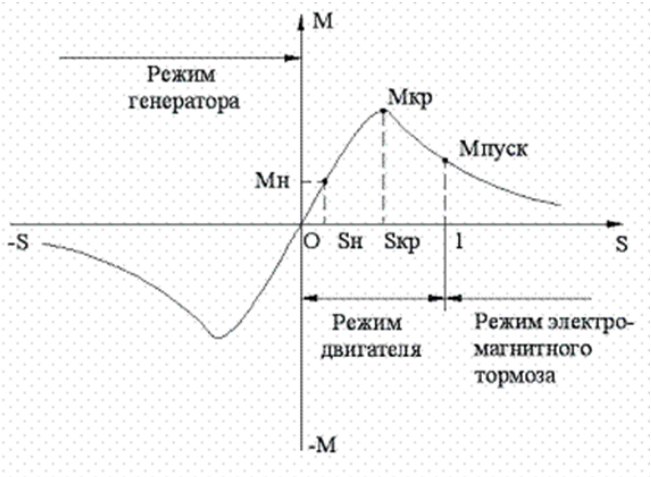


Рис. 3. Электромеханическая характеристика - зависимость момента от скольжения или тока M = f(s) или M = f(I)

Математическая модель механической части кабельной машины**,** строится на механической части, которая включает систему вращающихся барабанов, направляющих роликов и механизмов натяжения.

Уравнение движения

$$n = \frac{60 \times f}{p} \quad (5)$$

где: n — частота вращения ротора, об/мин; f — частота питающего напряжения (тока), Гц; p — число пар полюсов статора; 60 — коэффициент перевода секунд в минуты.

Регулирование частоты (рис.4) позволяет изменять скорость движения кабеля и обеспечивать требуемый технологический режим работы машины.

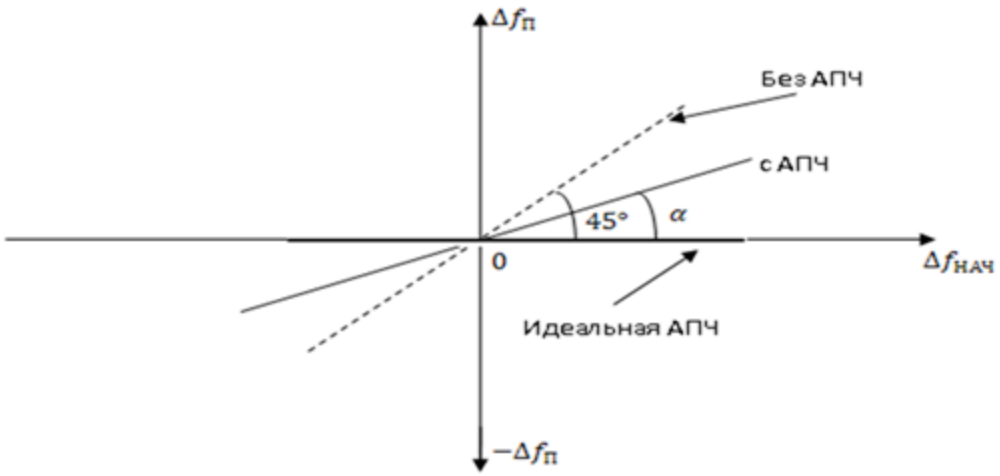


Рис. 4. Регулировочная характеристика -частотное управление

Регулировочная характеристика показывает линейную зависимость угловой скорости электропривода от частоты питающего напряжения при частотном регулировании. Это обеспечивает возможность плавного изменения

скорости движения кабеля в широком диапазоне без потери устойчивости системы.

Семейство механических характеристик при различных частотах питания иллюстрирует принцип частотного регулирования электропривода. С увеличением частоты происходит пропорциональное смещение характеристики вверх, что позволяет поддерживать требуемую скорость кабельной машины при изменении нагрузки.

Математическая модель механической части кабельной машины**.** Механическая часть КМ общего типа представляет собой совокупность вращающихся и поступательно движущихся элементов, обеспечивающих транспортировку, намотку и формирование кабельной продукции. Основными элементами механической системы являются приводные и приемные барабаны, направляющие ролики, система натяжения кабеля, а также передаточные механизмы, соединяющие исполнительные узлы с электроприводом.

Модель натяжения кабеля

$$T = m\,a + F_{тр} + F_{т} \qquad (7)$$

где: m - масса движущегося участка кабеля, a - ускорение движения, $F_{тр}$ - сила трения в направляющих элементах, $F_{т}$ — технологическое сопротивление, связанное с процессом намотки или скрутки.

В установившемся режиме, при постоянной скорости движения кабеля, уравнение упрощается и натяжение определяется в основном технологическим сопротивлением и силами трения.

Связь линейной и угловой скорости**.** Связь между угловой скоростью вращения барабана и линейной скоростью движения кабеля определяется выражением:

$$v = \Omega\,R \qquad (8)$$

где, v — линейная скорость движения кабеля, Ω — угловая скорость барабана, R — радиус намотки.

Изменение радиуса намотки. В процессе эксплуатации КМ радиус намотки увеличивается по мере заполнения барабана:

$$R = R_0 + k\;\; n \qquad (9)$$

где, R_0 — начальный радиус барабана, k — коэффициент увеличения радиуса, n — количество слоев намотки.

Все это приводит к изменению механической нагрузки и требует корректировки управляющих воздействий в системе автоматического регулирования.

Алгоритм функционирования цифрового двойника кабельной машины

Алгоритм функционирования ЦД КМ общего типа определяет последовательность обработки данных, выполнения расчетов и формирования

управляющих и диагностических решений на основе математической модели и информации, поступающей от реального оборудования. Реализация алгоритма обеспечивает непрерывное взаимодействие физического объекта и его цифрового представления в режиме, близком к реальному времени.

Работа ЦД основана на принципе замкнутого информационного контура, включающего сбор данных, их обработку, расчет состояния системы, сравнение с фактическими значениями и формирование выводов о текущем и прогнозном состоянии оборудования.

Цифровой двойник работает как замкнутая система управления с обратной связью.

Этапы работы:

1. Сбор данных с датчиков
2. Фильтрация и нормализация
3. Расчет состояния системы
4. Сравнение модели и измерений
5. Идентификация параметров
6. Диагностика состояния
7. Прогнозирование и оптимизация

Алгоритм функционирования цифрового двойника можно представлен на рис.5.

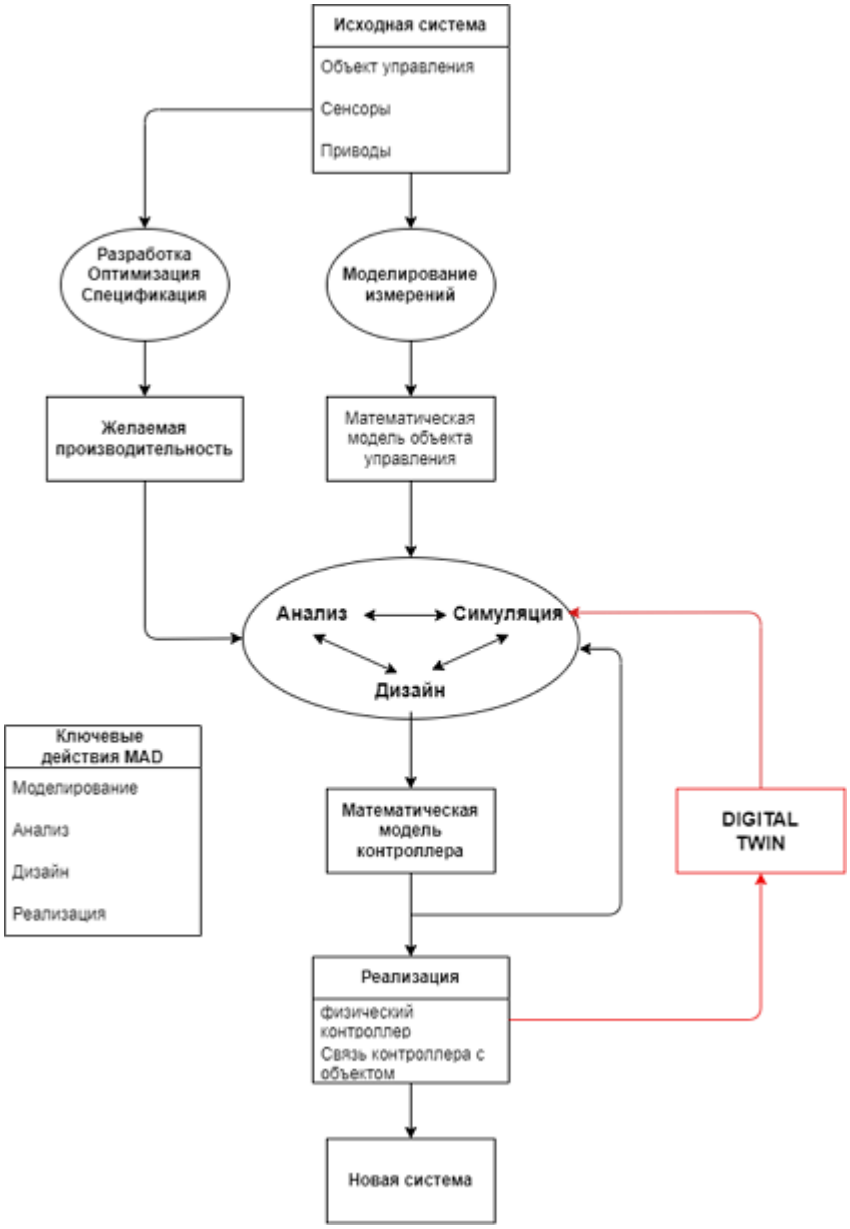


Рис. 5 Алгоритм функционирования цифрового двойника кабельной машины

Обсуждение результатов.

Разработанная модель позволит обеспечить: непрерывный мониторинг состояния КМ, расчет скрытых параметров (момент, нагрузка), прогнозирование перегрузок, адаптацию к износу оборудования, повышение точности управления, снижение энергопотребления, повышение стабильности натяжения кабеля.

Использование цифрового двойника позволяет существенно снизить влияние неопределённых факторов эксплуатации и повысить эффективность управления технологическим процессом.

Разработанный алгоритм (рис.5) обеспечивает непрерывное взаимодействие между реальным объектом и цифровой моделью, позволяя

выполнять мониторинг, диагностику и оптимизацию работы кабельной машины в режиме реального времени. Это формирует основу для построения интеллектуальной системы управления и повышения эффективности эксплуатации оборудования.

Выводы. В рамках проведенной научно-исследовательской работы была разработана комплексная математическая модель цифрового двойника кабельной машины общего типа. Выполнена декомпозиция системы на электромеханические подсистемы, что позволило описать ключевые процессы функционирования оборудования:

1.Показано, что электропривод определяет динамику системы и энергопотребление, а механическая часть формирует технологические ограничения, связанные с натяжением и изменением геометрии намотки.

2.Разработан алгоритм функционирования цифрового двойника, обеспечивающий полный цикл обработки данных: от измерения параметров до прогнозирования состояния и оптимизации режимов работы.

3.Полученные результаты создают научную и методическую основу для внедрения цифровых двойников в кабельное производство и повышения эффективности эксплуатации оборудования.

Список литературы

1. Александров Л.В., Шепелев Н.П. Моделирование — этап создания эффективных технических решений. — М.: НПО «Поиск», 1992. — 312 с.
2. Красильников Л.А., Лысенко А.Г. Волочильщик проволоки. — М.: Металлургия, 1987. — 256 с.
3. Эйгенсон Л.С. Моделирование. — М.: Советская наука, 1952. — 198 с.
4. Патент РУз на полезную модель № FAR 00659 от 22.07.2010. «Волочильная машина».
5. Ключев В.И. Теория электропривода. — М.: Энергоатомиздат, 2001. — 704 с.
6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. — М.: Высшая школа, 2004. — 736 с.
7. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. — СПб.: Питер, 2010. — 368 с.
8. Бутырин Г.М., Фролов Ю.М. Системы управления электроприводов. — М.: Изд-во МЭИ, 2015. — 412 с.
9. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. — Wiley, 2005. — 599 p.

10. Lee J., Lapira E., Bagheri B., Kao H.A. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. — Manufacturing Letters, 2013.

11. Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A. Digital twin-driven product design, manufacturing and service. — Advanced Engineering Informatics, 2018.

12. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. — Springer, 2017.

13. Qin S.J. Control performance monitoring: review and assessment. — Computers & Chemical Engineering, 1998.

14. Gladwin D.T. Industrial Control Systems: Modeling and Design. — Elsevier, 2020.

15. ISO 23247:2021. Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing. — ISO, 2021.

16. Zhang D., et al. Industrial cyber-physical systems and digital twin: A review. — IEEE Access, 2020.