

АРХИТЕКТУРА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ИНДУКЦИОННОЙ МЕДЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ КАБЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

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

Аннотация

В статье рассматривается архитектура цифрового двойника индукционной медеплавильной печи кабельного производства как элемента интеллектуальной производственной системы. Обоснована актуальность внедрения цифровых двойников в условиях цифровой трансформации промышленности и повышения требований к эффективности и надежности технологического оборудования. Представлена концептуальная структура цифрового двойника, включающая уровни физического объекта, сбора и обработки данных, математического моделирования, аналитической обработки и визуализации. Показано, что интеграция математических моделей тепловых и электромагнитных процессов с данными промышленного мониторинга позволяет обеспечить непрерывную оценку технического состояния печи и прогнозирование ее поведения в различных режимах эксплуатации. Рассмотрены возможности применения цифрового двойника для оптимизации технологических режимов, повышения энергоэффективности и снижения вероятности аварийных ситуаций в кабельном производстве.

Ключевые слова: цифровой двойник, индукционная медеплавильная печь, кабельное производство, архитектура системы, киберфизические системы, математическое моделирование, предиктивная диагностика, промышленный мониторинг, оптимизация режимов, интеллектуальные производственные системы.

Введение. В современных условиях развития промышленности особое значение приобретают технологии цифровизации производственных процессов, направленные на повышение эффективности эксплуатации оборудования, снижение затрат на техническое обслуживание и увеличение надежности технологических систем. Одним из наиболее перспективных направлений цифровой трансформации является внедрение цифровых двойников — виртуальных моделей реальных объектов, способных в режиме реального времени воспроизводить их состояние, прогнозировать поведение и поддерживать принятие управленческих решений.

Кабельные машины общего типа являются важным элементом технологических линий кабельного производства. От качества их работы зависят производительность предприятия, точность соблюдения технологических параметров и качество выпускаемой продукции. Эксплуатация такого оборудования связана с воздействием

переменных механических нагрузок, износом узлов и необходимостью поддержания стабильных режимов работы. Традиционные методы контроля и диагностики не всегда позволяют своевременно выявлять отклонения в работе оборудования и прогнозировать возможные неисправности.

В связи с этим актуальной задачей является создание цифрового двойника кабельной машины общего типа, обеспечивающего возможность моделирования рабочих процессов, анализа технического состояния оборудования и оптимизации режимов его функционирования. Применение цифровых двойников позволяет повысить точность мониторинга, сократить время простоя оборудования, снизить эксплуатационные затраты и повысить эффективность производственного процесса в целом.

Обзор объекта исследования - индукционная медеплавильная производственная линия «Up Cast». В качестве объекта исследования в работе рассматривается индукционная печь (ИП), входящая в состав линии непрерывного вертикального литья (ЛНВЛ) медной катанки по технологии «Up Cast». Данная технология широко применяется на предприятиях кабельной промышленности для получения высококачественной бескислородной меди, используемой при производстве токопроводящих жил кабельной продукции.

Технология «Up Cast» основана на непрерывном расплавлении катодной меди в индукционной печи с последующей кристаллизацией металла в графитовых кристаллизаторах и вертикальным вытягиванием готовой заготовки. Основным преимуществом данного метода является возможность получения медной катанки высокой чистоты с минимальным содержанием кислорода и неметаллических включений.



Рис.1 Производственная линия «Up Cast»

Производственная линия (рис. 1) включает следующие основные узлы систему загрузки медных катодов, индукционную плавильную печь, камеру выдержки

расплава, графитовые кристаллизаторы, вытяжной механизм, систему охлаждения, систему автоматического управления технологическим процессом.

Основным элементом линии является индукционная печь (рис.2), в которой осуществляется нагрев и плавление медных катодов за счет воздействия переменного электромагнитного поля. Электрическая энергия преобразуется в тепловую непосредственно внутри металла, что обеспечивает высокий коэффициент полезного действия и равномерное распределение температуры в объеме расплава.



Рис.2 Индукционная печь Производственной линии «Up Cast»

Принцип работы индукционной печи (рис.3) заключается в следующем. Медные катоды загружаются в тигель печи. При подаче напряжения на индуктор создается переменное магнитное поле, вызывающее возникновение вихревых токов в металлической шихте. В результате действия токов Джоуля происходит интенсивный нагрев материала и его последующее плавление.

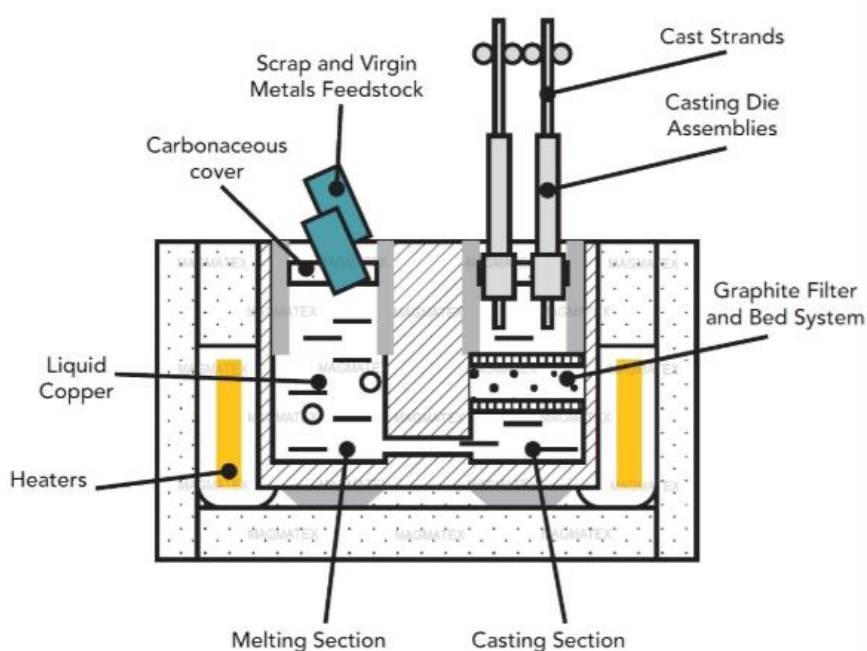


Рис. 3 Принцип работы индукционной печи

Производственной линии «Up Cast»

После достижения требуемой температуры расплавленная медь поступает в кристаллизаторы, где происходит формирование заготовки необходимого диаметра. Скорость вытяжки заготовки и температура расплава являются основными технологическими параметрами, определяющими качество готовой продукции.

Для обеспечения стабильности технологического процесса осуществляется непрерывный контроль температуры расплава, мощности индуктора, уровня металла в тигле и скорости вытягивания заготовки. Данные параметры используются в качестве входной информации для цифрового двойника, обеспечивающего анализ текущего состояния оборудования и прогнозирование его поведения в различных режимах эксплуатации.

Для разработки ЦД необходимо определить основные технические характеристики объекта исследования и параметры, оказывающие наибольшее влияние на качество технологического процесса. В качестве исследуемого оборудования рассматривается индукционная тигельная печь ЛНВЛ медной катанки по технологии «Up Cast».

Индукционная печь (таблица 1) предназначена для плавления медных катодов и поддержания требуемой температуры расплава перед подачей металла в кристаллизаторы. Особенностью данного оборудования является высокая энергоэффективность, возможность точного регулирования температуры и обеспечение равномерного распределения тепла по объему расплава.

Технические характеристики индукционной печи Up Cast

Таблица 1

Параметр	Значение
Тип печи	Индукционная тигельная
Материал	Медные катоды М00к
Температура плавления	1083 °С
Рабочая температура расплава	1150–1200 °С
Мощность индуктора	250–500 кВт
Частота питания	50–1000 Гц
Производительность	3–15 т/сут
Диаметр заготовки	8–30 мм
Система охлаждения	Водяная
Номинальная мощность индуктора	400 кВт
Напряжение питания	380В
Частота тока	50Гц
Объем тигля	1,5-2,0 т
Производительность линии	до 10 т/сутки
Тип охлаждения	Замкнутая водяная система
Точность измерения температуры	±2 °С

Работа оборудования характеризуется рядом технологических параметров, определяющих качество производимой медной заготовки и стабильность процесса литья. К основным параметрам относятся температура расплава, мощность индукционного нагрева, уровень расплавленного металла в тигле, скорость вытягивания заготовки, температура охлаждающей воды, потребляемый электрический ток, напряжение питания индуктора.

Для функционирования ЦД особое значение имеют параметры, изменяющиеся в процессе работы оборудования. Их значения поступают от измерительных датчиков и используются для корректировки математической модели в режиме реального времени.

В разработанной системе ЦД контролируются следующие параметры температура расплава $T(t)$; мощность нагрева $P(t)$; скорость вытяжки заготовки $V(t)$; уровень металла в тигле $H(t)$; ток индуктора $I(t)$; напряжение питания $U(t)$.

Изменение указанных параметров оказывает непосредственное влияние на качество получаемой медной катанки. Например, снижение температуры расплава может привести к нарушению процесса кристаллизации и образованию дефектов структуры металла. Повышение температуры сверх установленного диапазона вызывает увеличение энергозатрат и ускоренный износ футеровки печи.

Скорость вытягивания заготовки также является одним из наиболее важных параметров технологического процесса. При чрезмерном увеличении скорости ухудшаются условия формирования структуры металла, а при снижении производительности уменьшается эффективность работы оборудования.

Для оценки состояния оборудования в ЦД используются данные системы мониторинга, включающей температурные датчики, датчики уровня металла, измерители тока и напряжения, а также устройства контроля расхода охлаждающей воды.

Основные функции ЦД ИП:

- мониторинг текущих параметров работы ИП в режиме реального времени;
- моделирование тепловых и гидравлических процессов;
- прогнозирование режимов работы при изменении нагрузки и погодных условий;
- выявление отклонений и потенциальных неисправностей оборудования;
- оптимизация параметров регулирования для снижения энергопотребления;
- поддержка принятия решений оператором.

Таким образом, определены основные технические характеристики и эксплуатационные параметры исследуемого оборудования, которые используются при построении ЦД и проведении вычислительных экспериментов. Полученные данные являются исходной информацией для разработки программной реализации ЦД и исследования режимов работы ИП линии Up Cast.

Архитектура цифрового двойника индукционной печи. Цифровой двойник (ЦД) представляет собой виртуальную динамическую модель физического объекта (рис. 4), обеспечивающую воспроизведение его текущего состояния, прогнозирование изменения параметров и поддержку принятия решений при эксплуатации оборудования. Для индукционной печи (ИП) линии «Up Cast» ЦД разработан на основе интеграции математической модели, системы сбора данных и программных средств анализа технологических процессов.

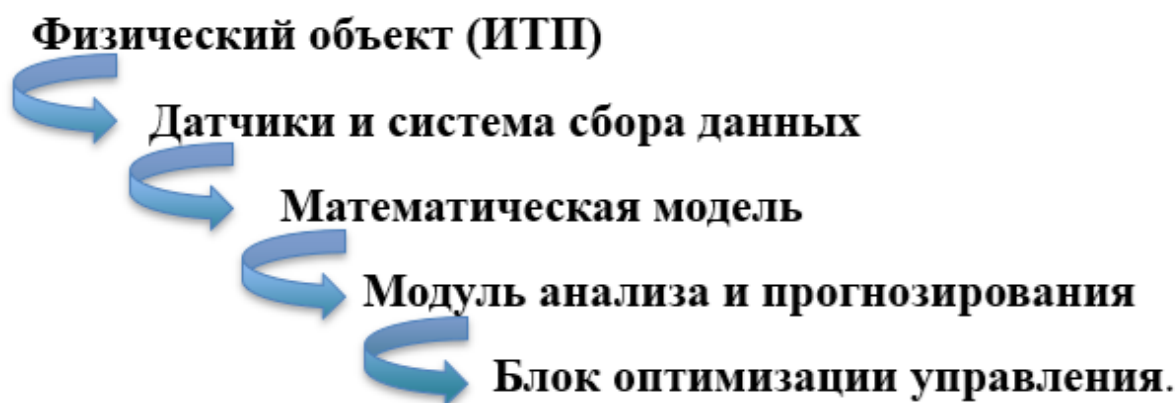


Рис. 4. Структура цифрового двойника индукционной печи

Основная функция ЦД заключается в непрерывном сопоставлении параметров реального объекта с результатами математического моделирования (рис. 3.5), что позволяет выявлять отклонения, прогнозировать неисправности и оценивать эффективность режимов эксплуатации.

Архитектура ЦД включает следующие функциональные уровни: физический объект, уровень сбора и передачи данных, уровень математического моделирования, уровень аналитической обработки, уровень визуализации и поддержки принятия решений.

Физический уровень представлен индукционной печью линии «Up Cast», оснащённой датчиками и исполнительными механизмами. Контролируемые параметры включают температуру расплава, мощность нагрева, ток и напряжение индуктора, уровень металла, расход охлаждающей воды и скорость вытягивания заготовки.

Данные поступают на уровень сбора информации, где осуществляется первичная обработка, фильтрация и передача в цифровую модель (рис. 5).



Рис. 5. Система независимого подключения Индукционной печи

Математическая модель включает взаимосвязанные подсистемы, тепловую модель, электрическую модель индукционного нагрева, модель теплообмена, модель технологической динамики.

На основе текущих данных выполняется расчет прогнозных параметров, которые передаются в аналитический модуль. Он обеспечивает сравнение фактических и расчетных значений, выявление отклонений, прогнозирование состояния и формирование предупреждений о нештатных режимах.

Результаты анализа отображаются на уровне визуализации, где оператор получает информацию о текущем и прогнозируемом состоянии оборудования в графическом виде (рис.6).

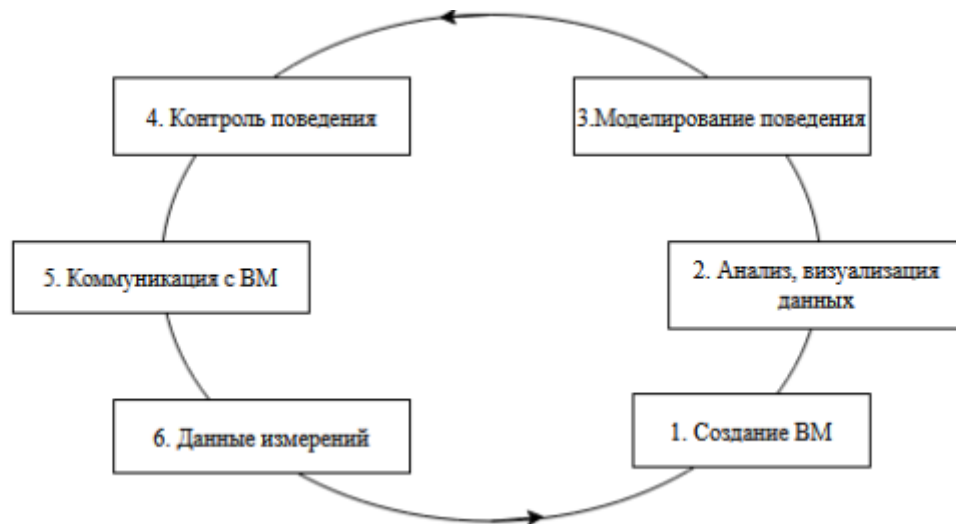


Рис. 6. Структурная схема ЦД

Особенностью архитектуры является наличие обратной связи между физическим объектом и цифровой моделью, обеспечивающей актуализацию расчетов в режиме реального времени. Это позволяет реализовать принципы предиктивного обслуживания и снизить вероятность аварийных остановок.

Полученные результаты - разработка программного обеспечения цифрового двойника. Программное обеспечение ЦД предназначено для реализации математической модели индукционной печи, обработки технологических данных, мониторинга состояния оборудования и прогнозирования режимов его работы (рис.7). Разработка выполнена с учетом требований надежности, масштабируемости и возможности интеграции в автоматизированные системы управления.

Основные функции программного комплекса включают в себя сбор и обработка данных с датчиков, хранение технологической информации, расчет по математической модели, анализ и диагностика состояния, прогнозирование параметров, визуализация результатов, формирование предупреждений.

Архитектура ПО построена по модульному принципу и включает модуль сбора данных, модуль математического моделирования, модуль анализа и диагностики, модуль прогнозирования, базу данных, модуль визуализации.

Модуль сбора данных обеспечивает получение и первичную обработку сигналов (фильтрацию, удаление выбросов и проверку корректности). Далее данные поступают в модуль математического моделирования, где реализуется численное решение системы дифференциальных уравнений тепловых и электрических процессов.

Модуль анализа выполняет сопоставление расчетных и фактических значений и формирует диагностические сообщения при превышении допустимых отклонений. Модуль прогнозирования оценивает динамику изменения параметров, вероятность перегрева, энергопотребление и производительность.

Для хранения данных используется база данных, обеспечивающая накопление текущих и архивных параметров, а также результатов моделирования и диагностики.

Пользовательский интерфейс отображает ключевые параметры процесса: температуру расплава, мощность нагрева, ток, уровень металла, скорость вытягивания и прогнозные значения, а также аварийные сообщения.

Реализация программного комплекса выполнена на языке Python с использованием библиотек NumPy, SciPy, Pandas, Matplotlib, SQLite и PyQt.



Рис.7. Предлагаемое техническое решение

Вывод: разработанное программное обеспечение обеспечивает функционирование цифрового двойника индукционной печи в режиме, близком к реальному времени, и формирует основу для развития интеллектуальных систем мониторинга и управления технологическим процессом.

Список литературы

1. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. – 2014.
2. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2019. – Vol. 15(4). – P. 2405–2415.
3. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 167685–167708.
4. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – Vol. 11. – P. 939–948.
5. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51(11). – P. 1016–1022.
6. Uhlemann T. H.-J., Lehmann C., Steinhilper R. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0 // *Procedia CIRP*. – 2017. – Vol. 61. – P. 335–340.
7. Boschert S., Rosen R. Digital Twin – The Simulation Aspect // In: *Mechatronic Futures*. – Springer, 2016. – P. 59–74.
8. Wang J., Wang L., Shi J. Digital Twin-driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – Vol. 114. – P. 3411–3433.
9. ISO 23247-1:2021. Automation Systems and Integration — Digital Twin Framework for Manufacturing — Part 1: Overview and General Principles. – ISO, 2021.

10. Rudskoy A. I., Bogachev A. V. Modeling of Induction Heating Processes in Metallurgical Equipment // *Metallurgical and Materials Engineering*. – 2020. – Vol. 26(3). – P. 215–224.
11. Davies R. W. Induction Heating Handbook. – New York: McGraw-Hill, 2017.
12. Rudnev V., Loveless D., Cook R., Black M. Handbook of Induction Heating. – CRC Press, 2017.