

# Проектирование комплекса индукционного оборудования с помощью теории систем с распределенными параметрами

А. Н. Ильюшина  
Санкт-Петербургский  
технический колледж управления  
и коммерции  
bdbyu@mail.ru

И. М. Першин  
Северо-Кавказский федеральный  
университет  
ivmp@mail.ru

В. Е. Трушников  
Санкт-Петербургский горный  
университет  
Trushnikov\_VE@pers.spmi.ru

И. М. Новожилов  
Санкт-Петербургский  
государственный  
электротехнический  
университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)  
novozhilovim@list.ru

Д. А. Первухин  
Санкт-Петербургский горный  
университет  
Pervukhin\_DA@pers.spmi.ru

Д. Л. Тукеев  
Санкт-Петербургский горный  
университет  
Tukeev\_DL@pers.spmu.ru

**Аннотация.** В рамках данного исследования ставится задача проектирования комплекса индукционного оборудования и автоматизированных средств подачи заготовок к индукторам с помощью теории систем с распределенными параметрами. Результаты данного исследования получены в рамках обучения в Северо-Кавказском федеральном университете под руководством Першина И.М.

**Ключевые слова:** идентификация систем, измерение, анализ, датчики

## I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие информационных технологий вносит большой вклад в развитие технологических процессов и систем управления. Современное производство это, как правило, компьютеризированное, сформированное закрытое производство замкнутого цикла. В условиях не безопасных производств [1, 2]. Это особенно актуально.

К небезопасным производствам относят производства, наносящие или способные наносить вред окружающей среде или человеку. К таким производствам относятся большая часть металлургических производств. Для обеспечения безопасности таких производств используют, как правило, наукоемкие, высокотехнологичные технологии. Например, производство алюминия [3] может привести к загрязнению подземных вод [4, 5]. Производство стали приводит к выбросам в CO<sub>2</sub> и других газов в окружающую среду [6]. Таким образом, автоматизация производства направлена на повышение не только экономической эффективности производства, но и на совершенствование технологии экологической безопасности.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках данного исследования ставится задача обобщения существующих методов решения, задач анализа объекта управления. Обзор примеров применения данных методов. Решение технической задачи анализа объекта минерально-сырьевого

комплекса с помощью теории систем с распределенными параметрами. А именно проектирование комплекса индукционного оборудования и автоматизированных средств подачи заготовок к индукторам, к печам сопротивления и к прессу, предусматривает нагрев заготовок до температур 730–900 °С, заготовок из хромоникелевых сталей до температур 1000–1150 °С и транспортировку их от места складирования «холодных» заготовок до места прессования.

## III. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим комплекс индукционного оборудования, обеспечивающего непрерывное и равномерное движение заготовки печи. сопротивления и к прессу 3150 тс предусматривает нагрев заготовок до температур 730–900 °С, заготовок из хромоникелевых сталей до температур 1000–1150 °С и транспортировку их от места складирования «холодных» заготовок до места прессования. Система управления должна обеспечивать равномерное распределение температурного поля по всей длине камеры. Это достигается за счет равномерного распределения нагревательных элементов и отсутствия технологических зазоров в оборудовании.

Максимальная производительность комплекса – 80 шт./смена в случае нагрева заготовок максимальной длины (750 мм) и диаметра (275 мм) (продолжительность смены – 8 часов).

В целом система получила название: комплекс индукционного оборудования, обеспечивающий непрерывное и равномерное движение заготовки печи. 3150 тс (АКИО).

АКИО работает во взаимодействии с внешними системами:

- печами (сопротивлений) для финишного нагрева заготовок,
- индуктором нагрева шайб,
- прессом,

которые, в совокупности, обеспечивают производство бесшовного металлического профиля путем прессования горячих металлических заготовок. Взаимодействие обеспечивается обслуживающим персоналом (рабочими, обеспечивающими загрузку/выгрузку оборудования систем, а также руководящим персоналом).

Цели АКМО:

- механизация процесса транспортирования заготовок;
- увеличение производительности участка до 80 заготовок из титана диаметром 124 мм и длиной 653 мм в смену;
- программное управление индукционным нагревом заготовок;
- регистрации технологических параметров процесса нагрева и транспортирования заготовок;
- генерации отчетов и документирование.

АКМО состоит из:

- механизированного транспорта холодных заготовок (ТХЗ), доставляющего заготовки к индукторам, оборудованного управляемым электроприводом;
- кранбалки для загрузки холодных заготовок на ТХЗ;
- накопителя холодных заготовок (НХЗ) для загрузки их в ТХЗ;
- механизированного толкателя (Т), оборудованного управляемым электрическим или пневматическим приводом, служащего для загрузки/выгрузки заготовок в индукторы поста нагрева;
- механизированного транспорта горячих заготовок (ТГЗ), оборудованного управляемым электроприводом, предназначенного для выгрузки на него горячих заготовок из индукторов и их доставки к печам, а также доставки к прессу горячих заготовок, выгруженных на него из печей;
- автоматизированного поста индукционного нагрева заготовок (ПН);
- позиции резервной загрузки/выгрузки ТГЗ (например, для загрузки печей холодными заготовками (минуя ПН, и выгрузки брака);
- автоматизированной информационно-управляющей системы (ИУС), хранящей, визуализирующей и документирующей информацию о состоянии системы и характеристиках заготовок в процессе их транспортирования к прессу, генерирующей программу управления индукторами ПН.

АКМО должен обеспечивать:

- идентификацию и ввод в ИУС установленных значений идентифицированных характеристик поступающих в систему заготовок, уложенных в НХЗ;

- механизированную загрузку ТХЗ холодными заготовками из НХЗ;
- механизированное транспортирование заготовок ТХЗ и их механизированную загрузку в индукторы ПН;
- автоматический нагрев заготовок в индукторах;
- механизированную выгрузку нагретых заготовок из индуктора на ТГЗ (на ее предварительно ориентированный ложемент);
- механизированное транспортирование и ориентацию ложемента с заготовкой на ТГЗ к печам;
- ручную выгрузку заготовки с ТГЗ для ее загрузки в печь;
- ручную загрузку заготовки на ложемент ТГЗ из печи;
- механизированное транспортирование заготовок на ТГЗ от печей к прессу (для ее ручной выгрузки с ложемента ТГЗ и загрузки пресса);
- механизированное транспортирование заготовок на ТГЗ в позицию и из позиции резервной загрузки/выгрузки заготовок (РЗ/В);
- автоматический ввод сигналов с датчиков оборудования АКМО и управление оборудованием АКМО в предусмотренных режимах;
- автоматическое управление нагревом заготовок в индукторах ПН;
- визуализацию процесса транспортирования и нагрева заготовок на дисплее ИУС;
- формирование ИУС предусмотренных экранных и бумажных отчетов.

Сценарий работы АКМО:

Работу совокупности устройств АКМО в автоматическом режиме как целого, обеспечивает ее ИУС, расположенная в удаленном от оборудования помещении (рис. 1). Функциональная схема АКМО содержит 3 подсистемы:

- автоматическую систему управления постом нагрева (АСУПН),
- транспортную систему (ТС),
- информационно-управляющую систему (ИУС).

ИУС и АСУПН связаны между собой каналом связи для обмена файлами и сообщениями, управляющей информацией.

Работа АКМО контролируется и/или управляется оператором ИУС (роль 1 в системе управления АКМО).

Перемещение ТХЗ, Т, ТГЗ в рабочем пространстве выполняется рабочими при непосредственном управлении ими приводами с пультов управления ТХЗ, Т (роль 2 в системе управления АКМО) и ТГЗ (роль 3 в системе управления АКМО) и соблюдении ими условий, обеспечивающих безопасность персонала.

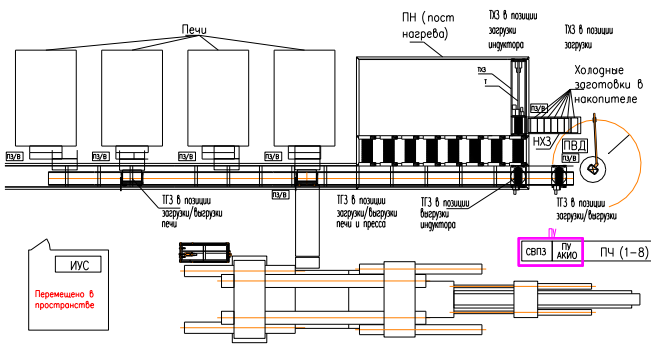


Рис. 1. Схема размещения оборудования

Перемещение заготовки из НХЗ на ТХЗ механизировано и выполняется рабочим (роль 2), обслуживающим ТХЗ.

Ориентация, подъем и опускание ложемента ТГЗ, производится рабочим (роль 3) вручную, посредством воздействия на соответствующие механизмы при выполнении необходимых условий, обеспечивающих безопасность персонала.

Работа постов нагрева (в автоматическом режиме) и их подсистем (питания, охлаждения) выполняется автоматически под контролем ИУС.

Загрузка заготовок в НХЗ производится рабочим (роль 3), с помощью кранбалки.

Загрузка/выгрузка заготовок на ложементы ТГЗ (в ПЗ/В) производится рабочими с помощью кранбалки (роли 2 и 3).

После идентификации, загрузки холодной заготовки в НХЗ или в ложемент ТГЗ рабочий (роль 2) вводит в ИУС значения параметров заготовки и тип устройства, в которое загружена заготовка (НХЗ или ТГЗ), после чего заготовка может быть использована в системе.

Загрузка и разгрузка печей, прессы, ложемента ТГЗ выполняется рабочими «вручную».

Рабочее пространство транспортной системы автоматически охраняется, ТГЗ и ТХЗ имеют устройства, прекращающие их движение при столкновении с препятствием.

Транспортная система включает в себя 2 автоматизированные тележки: транспорт холодных заготовок (ТХЗ) и транспорт горячих заготовок (ТГЗ). Тележки и стол оснащены автоматическими рабочими органами с необходимым количеством степеней свободы и программно управляются.

Задача состоит в создании автоматизированной управляемой транспортной системы, обеспечивающей загрузку индукторов холодными заготовками, взятыми из накопителя холодных заготовок и выгрузку горячих заготовок из индукторов в передаточную тележку. Цикл работы тележки включает перемещение груза на расстояние и возвращение назад без груза.

Основным требованием для разработки является – обеспечение производительности цеха 80 заготовок за смену (8 часов) и точности позиционирования – 2 мм,

также техническим заданием на проект ограничивается максимальная скорость движения 1,4 м/с.

Тележка должна обеспечивать транспортировку заготовок максимальной массой 300 кг, на максимальную длину пути – 25 м (ввиду того, что окончательные требования на планировку цеха так и не были утверждены, будем считать именно это расстояние до самого последнего индуктора). Для надежного перемещения собственная масса транспорта должна составлять 550 кг. Диаметр колес примем равным 400 мм, диаметр цапфы – 70 мм. Требуемую производительность транспортной системы следует вычислять на основе самого «напряженного» графика работы индуктора. В нашем случае для обеспечения производительности цеха в 80 заготовок за смену, вполне достаточно, время самого напряженного цикла считать равным 90 с. Загрузка заготовок в индуктор производится последовательно.

Логично предположить, что загруженная тележка должна двигаться медленнее, чем разгруженная, чтобы свести к минимуму возможность выпадения заготовки из ложемента, а также для экономии времени.

Время перемещения ТХЗ с заготовкой:  $t_{p1} = 35$  с,

Время перемещения ТХЗ без заготовки:  $t_{p2} = 30$  с.

Остаток времени (25 с) будет затрачен на загрузку/выгрузку индуктора (10 с) и при загрузке ТХЗ следующей заготовкой (15 с), таким образом, времена пауз будут равны  $t_{П1} = 10$  с,  $t_{П2} = 15$  с.

Ускорение и замедление (равно как и конечные скорости) загруженного ТХЗ, должны быть меньше чем разгруженного. Исходя из динамики системы, а также с учетом требуемого цикла работы, устанавливаем следующие значения ускорений с дальнейшим расчетом соответствующих скоростей:

- максимальное значение ускорения ТХЗ с заготовкой  $a_{max1} = 0,18$  м/с<sup>2</sup>;
- максимальное значение ускорения ТХЗ без заготовки  $a_{max2} = 0,25$  м/с<sup>2</sup>.

Циклограмма работы ТХЗ представлена на рис. 2.

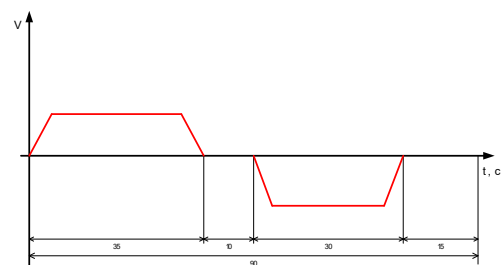


Рис. 2. Циклограмма работы ТХЗ

ТХЗ представляет собой двухосную четырехколесную тележку, каждая пара колес жестко связана со своей осью, от бокового смещения тележку удерживают реборды (кольцевые выступы на колесах). Одна из осей является ведущей, асинхронный мотор-редуктор связан с ведущей осью прямой передачей. Двигатель получает питание от расположенного на тележке преобразователя частоты по троллейной цепи, движение контролируется контроллером, который выдает команды на разгон, торможение, остановку и т. д.

#### IV. РАСЧЕТ И ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Нам необходимо обеспечить высокую точность регулирования и позиционирования. Для обеспечения данной задачи система управления должна иметь пространственную распределённость и высокую точность регулирования.

SEWEurodrive выпускает асинхронные двигатели в следующих вариантах исполнения: 750, 1000, 1500, 2000 и 3000 об/мин. С учетом вышеназванных преимуществ и недостатков выберем двигатель со средней частотой вращения, т.е.  $n = 1500$  об/мин. По максимальной частоте вращения выходного вала и предполагаемой номинальной частоте вращения двигателя определяем приблизительное передаточное число редуктора.

Частота вращения двигателя:

$$\omega_{\partial} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60},$$

$$\omega_{\partial} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1400}{60} = 146,53 \text{ рад/с.}$$

Суммарное передаточное число мотор-колесо:

$$i_{\Sigma} = \frac{\omega_{\partial}}{\omega_{\max}},$$

$$i_{\Sigma} = \frac{146,53}{4,775} = 30,687,$$

соответственно, и передаточное число мотор-редуктор  $i = 30,687$ .

Исходя из величины номинального момента на выходном валу, делается предварительный выбор двигателя с обязательной последующей проверкой параметров:

Выбранный двигатель:

- Тип DR63M4;
- Номинальная мощность:  $P = 180$  Вт ;
- Номинальный выходной момент:  $M = 39$  Н·м ;
- Передаточное число:  $i = 29,96$  ;
- Номинальный момент на валу двигателя:

$$M_H = \frac{M}{i} = \frac{39}{29,96} = 1,302 \text{ Н·м ;}$$

- Максимальный момент на валу двигателя:  $M_{\max} = 2,34$  Н·м ;
- Максимальный ток двигателя:  $I_{\max} = 1,6$  А ;
- Момент инерции ротора двигателя:  $J_M = 3,6 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup>.

Для проверки двигателя по нагреву используем метод эквивалентного момента. Однако с учетом [7, 8] и методов предложенных в [9, 10] получим нагрузочную диаграмму, которая, с учетом [11, 12] позволит получить эквивалентный по нагреву момент за цикл работы привода. Вместе с тем в работах [13, 14, 15] показано, что можно получить данный коэффициент и альтернативным способом. В рамках данного исследования будем использовать классический метод.

Для этого найдем эквивалентный момент  $M_{\text{экр}}$  на валу  $M_H$ :

$$M_{\text{экр}} = \sqrt{\frac{M_{\text{дв}}^2 \cdot t_{\text{дв}} + M_{\text{ш}}^2 \cdot t_{\text{ш}} + M_{\text{дт}}^2 \cdot t_{\text{дт}} + M_{\text{дт}}^2 \cdot t_{\text{дт}} + M_{\text{дт}}^2 \cdot t_{\text{дт}} + M_{\text{дт}}^2 \cdot t_{\text{дт}}}{T_n}}$$

$$= \sqrt{\frac{61,775^2 \cdot 4,561 + 28,965^2 \cdot 25,878 + 2 \cdot (-0,105)^2 \cdot 4,561 + 47,689^2 \cdot 3,82 + 18,742^2 \cdot 22,36 + (-7,383)^2 \cdot 3,82}{90}}$$

$$= 24,915 \text{ Нм}$$

Приводим к моменту на валу двигателя:

$$\frac{M_{\text{экр}}}{i} = \frac{24,915}{29,96} = 0,832 < M_H,$$

т.е. условие выполняется. Следовательно, выбранный двигатель удовлетворяет требованиям по нагреву.

Внешний момент инерции:

$$J_x = 91,2 \cdot m_L \cdot \left(\frac{v}{n_M}\right)^2;$$

$$J_x = 91,2 \cdot 850 \cdot \left(\frac{0,821}{1400}\right)^2 = 0,027 \text{ кг·м}^2.$$

Суммарный момент инерции:

$$J = J_x + J_M = 0,027 + 3,6 \cdot 10^{-4} = 2,702 \cdot 10^{-2} \text{ кг·м}^2.$$

При выборе преобразователя необходимо обеспечить, чтобы тип двигателя соответствовал типу преобразователя. Преобразователь следует выбрать по максимальному моменту (мощности) и току двигателя. Требуемая мощность преобразователя должна быть больше или равна мощности двигателя:  $P_C \geq P_{\text{двmax}}$ . Параметры двигателя и нагрузки определяют требования к току преобразователя:  $I_C \geq I_{\text{двmax}}$ . Зная величины максимального тока (1,6 А) и максимального вращающего момента (2,34 Н·м), можно по таблицам параметров двигателей, выбрать соответствующий преобразователь, в нашем конкретном случае таким преобразователем будет: Movidrive MD60A00155A340.

Параметры преобразователя:

Movidrive MD60A00155A340

- Напряжение сети: 3~380 В, 3~500 В
- Частота сети: 50...60 Гц ± 5%
- Номинальный ток сети: 3,6 А
- Максимальный момент: 6,0 Н·м

Частотные преобразователи обеспечивают полную электронную защиту преобразователя и двигателя от перегрузок по току, перегрева, утечки на землю и фазы.

#### V. ВЫВОДЫ

В данном проекте в общей сложности было разработано две системы – система управления транспортом холодных заготовок и система управления индукционным оборудованием, являющиеся частями одного крупного проекта. Каждая система является ограниченной, а их взаимодействие осуществляется рабочими на производстве.

Система управления транспортом холодных заготовок не только полностью удовлетворяет заданным требованиям, но и намного превосходит некоторые их них, в частности обеспечиваемая точность позиционирования тележки выше заданной. Система

полностью готова к монтажу и внедрению – выбрано оборудование и составлена программа управления.

Для системы управления индукционным нагревом была разработана общая структура и выбрано соответствующее оборудование.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ereemeeva A.M., Kondrasheva N.K., Khasanov A.F., Oleynik I.L. Environmentally Friendly Diesel Fuel Obtained from Vegetable Raw Materials and Hydrocarbon Crude // *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 5. <https://doi.org/10.3390/en16052121>
- [2] Ilyushin Y.V. Development of a Process Control System for the Production of High-Paraffin Oil. *Energies* 2022, 15, 6462. <https://doi.org/10.3390/en15176462>
- [3] Marinina O., Nechitailo A., Stroykov G., Tsvetkova A., Reshneva E., Turovskaya L. Technical and Economic Assessment of Energy Efficiency of Electrification of Hydrocarbon Production Facilities in Underdeveloped Areas. *Sustainability* 2023, 15, 9614. <https://doi.org/10.3390/su15129614>
- [4] Golovina E., Shchelkonogova O. Possibilities of Using the Unitization Model in the Development of Transboundary Groundwater Deposits. *Water (Switzerland)*, 2023, 15(2), 298. <https://doi.org/10.3390/w15020298>
- [5] Ereemeeva A.M., Ilyushin Y.V. Automation of the control system for drying grain crops of the technological process for obtaining biodiesel fuels. *Sci Rep* 13, 14956 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41962-0>
- [6] Sidorenko A.A., Dmitriev P.N., Alekseev V.Yu., Sidorenko S.A. Improvement of technological schemes of mining of coal seams prone to spontaneous combustion and rockbumps. *Journal of Mining Institute*. 2023, p. 1-13. <https://doi.org/10.31897/PML2023.37>
- [7] Ilyushin Y.V., Kapostey E.I. Developing a Comprehensive Mathematical Model for Aluminium Production in a Soderberg Electrolyser. *Energies* 2023, 16, 6313. <https://doi.org/10.3390/en16176313>
- [8] Pershin I.M., Papush E.G., Kukharova T.V., Utkin V.A. Modeling of Distributed Control System for Network of Mineral Water Wells. *Water* 2023, 15, 2289. <https://doi.org/10.3390/w15122289>
- [9] Kukharova T.V., Ilyushin Y.V., Asadulagi M.-A.M. Investigation of the OA-300M Electrolysis Cell Temperature Field of Metallurgical Production. *Energies* 2022, 15, 9001. <https://doi.org/10.3390/en15239001>
- [10] Olga Afanaseva, Oleg Bezyukov, Dmitry Pervukhin, Dmitry Tukeev. Experimental Study Results Processing Method for the Marine Diesel Engines Vibration Activity Caused by the Cylinder-Piston Group Operations. *Inventions* 2023, 8(3), 71; <https://doi.org/10.3390/inventions8030071>
- [11] Martirosyan K.V., Chenyshev A.B., Martirosyan A.V. Application of Bayes Networks in the Design of the Information System “Mineral Water Deposit”. In Proceedings of the 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russia, 24–26 May 2023; pp. 236–239. <https://doi.org/10.1109/SCM58628.2023.10159085>.
- [12] Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Chernyshev A.B. Investigation of Popov’s Lines’ Limiting Position to Ensure the Process Control Systems’ Absolute Stability. In Proceedings of the 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russia, 24–26 May 2023; pp. 69–72. <https://doi.org/10.1109/SCM58628.2023.10159089>.
- [13] Katysheva E. Analysis of the Interconnected Development Potential of the Oil, Gas and Transport Industries in the Russian Arctic. *Energies* 2023, 16, 3124. <https://doi.org/10.3390/en16073124>
- [14] Ilyushin Y., Afanaseva O. Development of the drilling screws temperature field pulse management for the Kislovodsky narzan deposit hot mineral water mining (2019) International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 19 (2.1), pp. 849-856.
- [15] Polekhina V.S., Shestopalov M.Y., Ilyushin Y.Y. Identification of Magnetic Field Strength Realisation as a Necessary Solution for High-Quality Metal Synthesis (2022) Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2022, pp. 831-833. DOI: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755649