УДК 621.365

Разработка и исследование системы управления индуктором для электротехнических комплексов по симметричному индукционному нагреву металлоизделий шарообразной формы¹

В.Н. Мещеряков¹, С.С. Титов², Д.В. Безденежных²

¹ ФГБОУВПО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Российская Федерация

² ООО «НПП Система48», г. Липецк, Российская Федерация

E-mail: algebra934@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Создание энергоэффективного оборудования непрерывного действия, обеспечивающего симметричный на заданную глубину нагрев под термообработку изделий шарообразной формы без окисления и обезуглероживания, является актуальным для ряда отраслей промышленности, в частности в массовых производствах мелющих тел для горно-обогатительных фабрик и цементных заводов, шариков подшипников качения и клапанов в гидравлических системах, в том числе высокоизносостойких шариков в обратных клапанах глубинных насосов для нефтедобычи, и др. Более всего этой востребованной промышленностью совокупности качеств нагрева отвечает индукционный способ с прямым и высокоскоростным (секунды – доли секунды) превращением электрической энергии в тепловую, отличающийся простотой регулирования температуры и глубины прогрева, что позволяет получать после закалки и отпуска оптимальное сочетание высокой поверхностной твердости изделий (контактная выносливость) с пластичностью сердцевины (противораскалываемость). Однако при всех известных достоинствах этого способа применимость его с обеспечением требуемой симметричности нагрева в настоящее время ограничена в мировой практике преимущественно изделиями непрерывного сечения или близкого к таковому. Следовательно, актуальной задачей является разработка системы управления индуктором для электротехнических комплексов оборудования, обладающих заявленными выше качествами.

Материалы и методы: Исследование проведено с использованием теории автоматического управления, теории индукционного нагрева, а также методов математического моделирования. Численное решение уравнений математических моделей выполнено на ЭВМ с применением пакетов математических программ Simulink и FEMM (оба продукта – freetrialверсии).

Результаты: Разработана и исследована система управления индуктором, позволяющая осуществлять нагрев как неподвижных металлоизделий шарообразной формы, так и движущихся через индуктор, принцип работы которой заключается в сочетании частотно- и широтно-импульсной модуляции с непрерывной подстройкой частоты под резонансную. Представлены результаты проверки работоспособности разработанной системы управления на симуляционной модели в ПО Simulink (freetrialверсия).

Выводы: Полученные результаты будут использованы при разработке программного обеспечение для управляющего микроконтроллера электротехнического комплекса для симметричного индукционного нагрева под термообработку металлоизделий шарообразной формы на заданную глубину токами повышенной частоты. Указанный электротехнический комплекс может быть использован на предприятиях, выпускающих металлоизделия шарообразной формы, эксплуатирующиеся в тяжелых условиях, обусловливаемых ударными и иными видами нагрузки контактных поверхностей. К этим изделиям в первую очередь следует отнести мелющие шары (обогащение железной руды на ГОКах) и шарики подшипников качения различных типоразмеров.

Ключевые слова: система управления индуктором, индукционный нагрев, электротехнический комплекс, симметричный индукционный нагрев, металлоизделие шарообразной формы, токи высокой частоты.

Development and study of a control system of the electrotechnical equipment inductor for symmetric induction heating of spherical metal products

V.N. Meshcheryakov¹, S.S. Titov², D.V. Bezdenezhnykh²

¹ Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

² OOO «NPP Sistema48» (Research and Production Enterprise), Lipetsk, Russian Federation

E-mail: algebra934@yandex.ru

Abstract

Background: Production of energy-efficient continuous operation equipment ensuring symmetrical heating to a given depth for thermal treatment of spherical products without oxidation and decarburization is an urgent problem in a number of industries, such as mass production of milling bodies for mining and concentrating enterprises and cement plants, balls for rolling bearings and valves in hydraulic systems, as well as wear-resistant balls in the backwater gates of deepwell pumps for oil production, etc. Induction heating with direct high-rate (several seconds or fractions of a second) conversion of electric energy into heat meets these industrial heating requirements best of all. This method of heating is characterized by simple temperature and heating depth control, which makes it possible to obtain the optimum combination

¹ Данное исследование было выполнено по программе «Старт» Фонда содействия инновациям (договор № 1195ГС1/21661 от 05.05.2016).

of a high surface hardness (back-to-back endurance) of products with a relatively plastic core (anticracking) after quenching and tempering. However, despite all these advantages of the method, it is currently only applied around the world to ensuring the required heating symmetry of continuous or near-continuous cross section products. All this makes it urgent to develop an inductor control system for electrotechnical equipment with the above-mentioned characteristics.

Materials and methods: The study employed the automatic control theory, induction heating theory and mathematical modelling methods. The equations of the mathematical models were solved on a computer in the mathematical software packages Simulink and FEMM (trial versions of both programs).

Results: We have developed and studied an inductor control system designed to heat both fixed spherical metal products and those moving through the inductor. The operation principle of the control system is a combination of frequency and pulse-width modulation with continuous frequency adjustment to the resonance one. In this work, we present the results of functional tests of the developed control system on a simulation model in the Simulink software (free trial version).

Conclusions: The obtained results will be used for developing electrotechnical equipment microcontroller software for symmetrical induction heating to a predetermined depth by overfrequency currents before thermal treatment of spherical metal products. The mentioned electrotechnical equipment can be used at the enterprises producing spherical metal products operating under heavy conditions caused by impact and other types of loading of contact surfaces. Such products, first of all, include milling balls (iron ore concentration at ore-mining and concentrating enterprises) and balls for rolling bearings of various types and sizes.

Key words: inductor control system, induction heating, electrotechnical equipment, symmetrical induction heating, spherical metal product, high frequency currents.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.2.043-050

Введение. В последние несколько лет вышел ряд публикаций, затрагивающих вопросы энергоэффективного симметричного индукционного нагрева под термообработку металлоизделий шарообразной формы на заданную глубину токами повышенной частоты. В качестве идеи технического решения задачи симметричного индукционного нагрева металлоизделий шарообразной формы в публикациях [1] указывается новая конфигурация индуктора, направляющий желоб которого (он же транспортирующий профиль) изогнут в пространственную спираль с вертикальной осью симметрии. Вследствие высоких требований к качеству продукции (мелющие тела для ГОКов и цементных заводов, шарики подшипников качения, клапаны в гидравлических системах и т.д.), особенно актуальной видится постановка задачи по разработке автоматической системы управления указанным индуктором, которая обеспечивала бы заявленные выше качества нагрева.

Методы исследования. Основной задачей разрабатываемой автоматической системы управления индуктором является поддержание заданных технологических параметров индукционного нагрева металлоизделий шарообразной формы. К основным из этих параметров относятся — удельная мощность к поверхности нагреваемого изделия и активная глубина нагрева.

Регулирование технологических параметров нагрева возможно путем воздействия на электрические параметры инвертора. К последним относится величина U_1 (действующее значение) и частота f выходного напряжения инвертора [2, 3]. Исходя из соотношения между этими двумя параметрами, существует несколько способов регулирования выходной энергии инвертора. Одним из самых распространенных способов регулирования выходной энергии инвертора является частотная модуляция (ЧМ) [4] его выходного напряжения. При этом величина напряжения остается постоянной, а величина выходного

тока регулируется воздействием на частоту, т.е. путем увеличения реактивной составляющей импеданса контура по мере удаления частоты от резонансной.

Другой способ регулирования [5] — это широтно-импульсная модуляция (ШИМ) выходного напряжения. ШИМ реализуется путем фазового сдвига на определенный угол управляющих сигналов транзисторов одного плеча инвертора относительно другого. Величина напряжения в данном случае зависит от величины фазового сдвига, а частота напряжения задается независимо. Величина выходного тока при этом будет зависеть как от амплитуды, так и от частоты выходного напряжения.

Применительно к рассматриваемой установке целесообразно применить второй способ управления, поскольку он обеспечивает два канала регулирования инвертором. Следовательно, задача, возлагаемая на систему управления, будет заключаться в расчете задания на величину и частоту выходного напряжения в зависимости от заданной мощности нагрева $P_{\rm H}$ и заданной активной глубины нагрева шара $\Delta_{\rm 3}$.

На рис. 1 изображена блок-схема разработанной системы управления, содержащая: однофазный мостовой инвертор на силовых транзисторах 1, запитанный от источника постоянного напряжения с параллельным подключением конденсатора 15 в звено постоянного тока; согласующий трансформатор 16, первичная обмотка которого подключена к выходу мостового инвертора 1, а вторичная обмотка подключена к последовательно соединенным компенсирующему конденсатору 18, датчику тока индуктора 17 и обмотке индуктора 20; датчик напряжения индуктора 19, параллельно подключенный к обмотке индуктора 20; блок вычисления эквивалентной индуктивности и активного сопротивления заготовки в индукторе 2, первый вход которого подключен к выходу датчика тока индуктора 17, а второй вход к выходу датчику напряжения индуктора 19; блок вычисления резонансной частоты индуктора 3, входы которого подключены к выходам блока вычисления эквивалентной индуктивности и активного сопротивления заготовки в индукторе 2; блок определения действующего значения тока индуктора 4, первый вход которого подключен к выходу блока ограничения заданной частоты тока индуктора 7, а второй вход к выходу датчика тока индуктора 17; первый блок деления 9, на первый вход которого задается значение мощности на нагрев заготовки, а на второй вход подается значение сопротивления с выхода блока вычисления эквивалентной индуктивности и активного сопротивления заготовки в индукторе 2; блок вычисления квадратного корня 10, вход которого подключен к выходу первого блока деления 9; регулятор тока индуктора 5, первый вход которого подключен к выходу блока вычисления квадратного корня 10, а второй вход к выходу блока определения действующего значения тока индуктора 4; блок сравнения 8, вход которого подключен к выходу регулятора тока индуктора 5; блок интегрирования 6, вход которого подключен к выходу блока сравнения 8; блок суммирования 11, на первый вход которого подается значение, равное единице, а второй вход подключен к выходу блока интегрирования 6; блок умножения 12, на первый вход которого задается верхнее ограничение частоты тока индуктора, а на второй вход подключен выход блока суммирования 11; второй блок деления 13, на первый вход которого задается нижнее ограничение частоты тока индуктора, а на второй вход подключен выход блока суммирования 11; блок ограничения заданной частоты тока индуктора 7, на первый вход которого подключен выход блока умножения 12, на второй вход подключен выход блока вычисления резонансной частоты индуктора 3, на третий вход подключен выход второго блока деления 13; блок формирования управляющих импульсов силовых транзисторов инвертора 14, на первый вход которого подается заданное значение выходного напряжения инвертора с выхода регулятора тока индуктора 5, а на второй вход подается заданное значение частоты тока индуктора с выхода блока ограничения заданной частоты тока индуктора 7.

Система управления, в соответствии со схемой рис. 1, работает следующим образом. В системе задается величина мощности на нагрев заготовки $P_{\rm H}^*$, первоначальное минимальное значение частоты тока индуктора $f_{\rm HH}$, первоначальное максимальное значение частоты тока индуктора $f_{\rm BH}$. Диапазон частоты $f_{\rm HH}...f_{\rm BH}$ зависит от диапазона допустимой активной глубины закалки заготовки $\Delta_{\rm max}...\Delta_{\rm min}$, что объясняется поверхностным эффектом, и находится по следующим формулам [6]:

$$\begin{cases} f_{\rm BH} = \frac{1}{\pi \cdot \Delta_{\min}^2 \mu_0 \mu_3 \frac{1}{\rho_3}}, \\ f_{\rm HH} = \frac{1}{\pi \cdot \Delta_{\max}^2 \mu_0 \mu_3 \frac{1}{\rho_3}}, \end{cases}$$
 (1)

где μ_3 — относительная магнитная проницаемость материала заготовки; ρ_3 — удельное электрическое сопротивление материала заготовки.

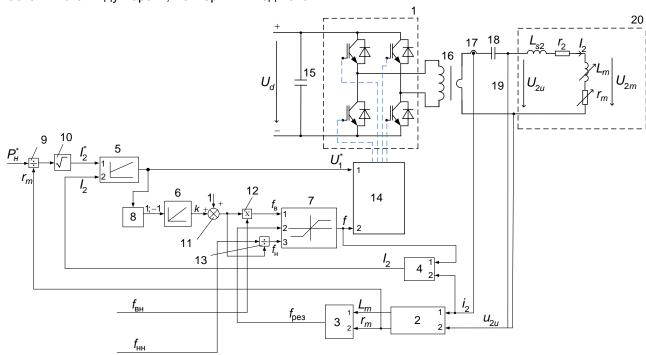


Рис. 1. Блок-схема разработанной системы управления индуктором

Величина мощности на нагрев заготовки $P_{\rm H}^{\ *}$ используется для расчета задания на ток индуктора I_2^* по следующей формуле:

$$I_2^* = \sqrt{\frac{P_{\rm H}^*}{r_m}},\tag{2}$$

где r_m – эквивалентное активное сопротивление заготовки.

В процессе прохождения шарообразной заготовки через индуктор значительно изменяется резонансная частота контура $f_{\rm pes}$, образованного обмоткой индуктора 20 и компенсирующим конденсатором 18. Это связано с изменением эквивалентной индуктивности L_m и эквивалентного активного сопротивления r_m заготовки в моменты ее входа и выхода из индуктора. Следовательно, в устройстве осуществляется непрерывный расчет эквивалентной индуктивности и эквивалентного активного сопротивления заготовки в блоке 2 и резонансной частоты в блоке 3 следующим образом.

Эквивалентное напряжение на заготовке \dot{U}_{2m} (в векторной форме) рассчитывается как [7, 8]

$$\dot{U}_{2m} = \dot{U}_{2u} - j \cdot 2\pi f L_{s1} \dot{I}_2 + r_1 \dot{I}_2, \qquad (3)$$

где \dot{U}_{2u} – напряжение на индукторе, измеренное датчиком 19; I_2 – ток индуктора, измеренный датчиком 17; f – частота тока индуктора; L_{s1} – индуктивность рассеяния обмотки индуктора; r_1 — активное сопротивление обмотки индуктора; ј мнимая единица.

Измерив сдвиг фаз $lpha_m$ между эквивалентным напряжением \dot{U}_{2m} и током \dot{l}_2 , а также их амплитудные значения U_{2mA} , I_{2A} определяются величины r_m , L_m :

$$\begin{cases} r_m = \frac{U_{2mA}}{I_{2A}} \cos \alpha_m, \\ L_m = \frac{U_{2mA}}{2\pi f I_{2A}} \sin \alpha_m. \end{cases}$$
 (4)

Резонансная частота контура определяет-

$$f_{\text{pes}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{\text{s1}} + L_m)C_2}},$$
 (5)

где C_2 – емкость компенсирующего конденсатора 18. Регулирование тока индуктора осуществ-

ляется с помощью ПИ-регулятора 5, выход которого воздействует на величину задания выходно-

го напряжения инвертора U_1 .

В моменты входа и выхода шарообразной заготовки из индуктора значение резонансной частоты $f_{\text{peз}}$ может уходить за пределы ограничений частоты тока индуктора $f_{\rm HH}$, $f_{\rm BH}$, в этом случае начинает работать блок ограничения 7, частота тока индуктора f при этом отличается от резонансной и равна одному из двух ограничений. В этом случае для поддержания заданного тока индуктора l_2 регулятор тока 5 начинает увеличивать задание выходного напряжения инвертора U_1 . При достижении заданием выходного напряжения максимума $U_{1\max}^*$ регулятор тока 5 уходит в ограничение. Дальнейшее поддержание заданного тока I_2^* невозможно только за счет регулирования задания U_1 , поэтому в устройство добавлен блок сравнения 8, который контролирует задание напряжения U_1^* : при $U_1^* = U_{1\text{max}}^*$ выход блока сравнения выдает число «1», при $U_1^* < U_{1\text{max}}^*$ – на выходе «-1». Значение на выходе блока сравнения 8 подается на вход блока интегрирования 6, с выхода которого формируется значение коррекции частоты k. Минимальное значение коррекции ограничено нулевым значением. При наличии «1» на выходе блока сравнения 8 коррекция частоты к начинает возрастать, тем самым увеличивая допустимый диапазон изменения частоты тока индуктора по следующим формулам:

$$\begin{cases} f_{\rm B} = (1+k)f_{\rm BH}, \\ f_{\rm H} = \left(\frac{1}{1+k}\right)f_{\rm HH}, \end{cases}$$
 (6)

где $f_{\rm B}$ — верхнее ограничение частоты тока индуктора; $f_{\rm H}$ — нижнее ограничение частоты тока индуктора.

Далее начинает изменяться выходная частота тока индуктора, так как она равна одному из двух ограничений. Это позволяет обеспечить поддержание заданного тока индуктора, следовательно, заданной мощности на нагрев заготовки $P_{\rm H}$, что является более приоритетным, чем удержание активной глубины закалки заготовки в диапазоне $\Delta_{\mathsf{max}}...\Delta_{\mathsf{min}}.$

При полном входе шарообразной заготовки в индуктор значение резонансной частоты $f_{\rm pes}$ возвращается в диапазон $f_{\rm HH}...f_{\rm BH}$, регулятор тока 5 выходит из ограничения, на выходе блока сравнения 8 – значение, равное «-1», значение коррекции частоты k на выходе блока интегрирования 6 уменьшается до нуля.

Таким образом, реализация предложенной системы управления позволит поддерживать заданную мощность на нагрев быстродвижущихся шарообразных заготовок как в момент их полного нахождения в индукторе, так и в моменты их входа и выхода из индуктора, когда резонансная частота индуктора значительно изменяется.

Результаты исследования. Для проверки правильности функционирования управления индуктором была разработана симуляционная модель в программном продукте Simulink Matlab (freetrial версия) в соответствии со схемой рис. 1.

Первоначально отладка системы управления осуществлялась при неизменных значениях r_{m} , L_{m} , соответствующих положению заготовки в центре индуктора. На рис. 2 и 3 показаны графики тока I_2 и напряжения U_{2u} на индукторе при разной глубине регулирования выходного напряжения инвертора U_1 (0,5 и 0,85), в обоих случаях действующее значение тока составляло около 650 А, выходная частота равна резонансной, при

этом напряжение звена постоянного тока U_d было разным. Анализ полученных графиков показывает, что с увеличением глубины регулирования улучшается гармонический состав тока индуктора и его форма приближается к синусоидальной.

В то же время работа при значениях глубины регулирования, близких к единице, снижает запас по выходному напряжению. Следовательно, выбираем значение глубины регулирования при полном нахождении шарообразной заготовки в индукторе 0,6–0,8 в целях обеспечения запаса регулирования по напряжению в моменты прохода заготовки через индуктор. При этом напряжение звена постоянного тока должно быть около 150 В.

Для отладки системы управления при работе с движущейся через индуктор шарообразной заготовкой в программе FEMM рассчитаны значения эквивалентной индуктивности L_m и эквивалентного активного сопротивления r_m в зависимости от положения заготовки в индукторе с разбиением области индуктора на 105 точек (шаг 0,07 см). Координаты, соответствующие положению заготовки (центра шара) в индукторе, показаны на рис. 4. Рассчитанные значения r_m , L_m показаны на рис. 5.

В дальнейшем указанные рассчитанные значения в табличной форме переносились в симуляционную модель для моделирования работы с движущейся заготовкой. На рис. 6 показаны графики переходных процессов при проходе шарообразной заготовки через индуктор.

Диапазон частоты при моделировании задавался в интервале от 70 до 80 кГц. При полностью пустом индукторе (время от 0 до 0,02 с) срабатывает ограничение по частоте и ПИрегулятор тока уходит в ограничение, глубина регулирования U^* при этом максимальна и равна ограничению 0,95. Поэтому для возможности отработки заданного значения тока индуктора включается И-регулятор, увеличивается допустимый диапазон частот, следовательно, растет частота тока индуктора. После достижения током индуктора задания ограничение медленно возвращается к заданному диапазону, так как заготовка заходит в индуктор и значение резонансной частоты уменьшается, тем самым поддерживается оптимальное значение глубины регулирования, равное 0,8. При входе значения резонансной частоты в заданный диапазон 70-80 кГц частота тока совпадает с резонансной, заданный ток поддерживается только за счет изменения глубины регулирования. При выходе заготовки из индуктора резонансная частота уходит из заданного диапазона, ПИ-регулятор уходит в ограничение, заданный ток поддерживается за счет увеличения диапазона ограничения и, следовательно, за счет увеличения частоты тока.

Реализация разработанной системы управления индуктором имеет широкое практическое применение в электротехнических комплексах для симметричного индукционного нагрева металлоизделий шарообразной формы. Использование этих комплексов позволяет получить редкостный спаренный эффект — повышение качества изделия с одновременным повышением энергозатрат на нагрев в сравнении с классическими подходами. Анализ энергетических показателей электротехнических комплексов подробно описан в [10].

Выводы. В рамках описанного исследования была разработана система управления, позволяющая осуществлять нагрев как неподвижных шариков, так и движущихся через индуктор. Принцип работы системы управления заключав сочетании частотно- и широтноимпульсной модуляции с непрерывной подстройкой частоты под резонансную. Работоспособность разработанной системы управления была проверена на симуляционной модели. Полученные результаты будут использованы при разрапрограммного обеспечение для управботке ляющего микроконтроллера электротехнического комплекса для симметричного индукционного нагрева под термообработку металлоизделий шарообразной формы на заданную глубину токами повышенной частоты.

Указанный электротехнический комплекс может быть использован на предприятиях выпускающих металлоизделия шарообразной формы, эксплуатирующиеся в тяжелых условиях, обусловливаемых ударными и иными видами нагрузки контактных поверхностей. К этим изделиям в первую очередь следует отнести мелющие шары (обогащение железной руды на ГОКах) и шарики подшипников качения различных типоразмеров. Полученные результаты исследования могут быть также использованы при разработке новых установок индукционного нагрева токами повышенной частоты.

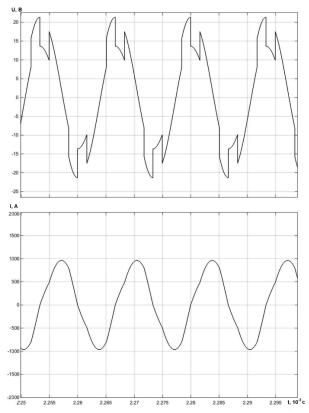


Рис. 2. Графики тока и напряжения индуктора при глубине регулирования, равной 0,5

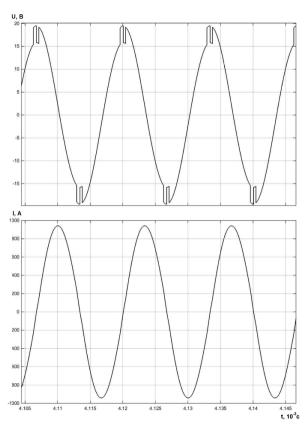


Рис. 3. Графики тока и напряжения индуктора при глубине регулирования, равной 0.85

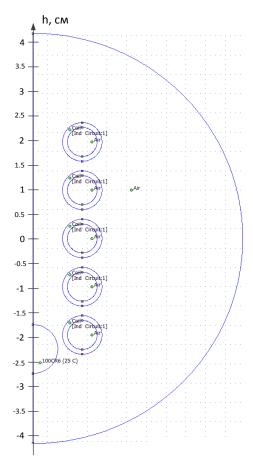


Рис. 4. Координаты для определения положения заготовки в индукторе

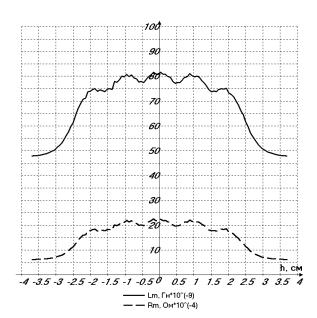


Рис. 5. Зависимости r_m , L_m от положения заготовки в индукторе

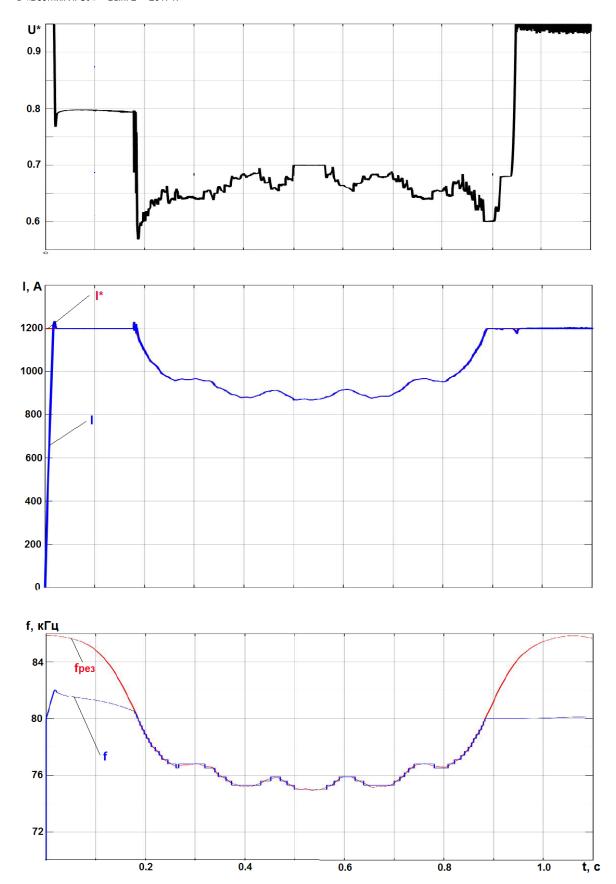


Рис. 6. Графики переходных процессов при работе с движущейся заготовкой

Список литературы

- 1. Пат. № 148725 Российская Федерация, МПК Н05В6/36. Индуктор непрерывного действия для равномерного осесимметричного индукционного нагрева изделий шарообразной формы «КОМБИСПИРАЛЬ» / С.С. Титов; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34. 2 с.

 2. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. Power
- 2. **Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P.** Power Electronics.Converters, application and design.Second edition. New Jersey, USA: A John Wiley and Sons, Inc, 2006. 802 p.
- 3. **Rashid M.H.** Power Electronics Handbook, second edition. San Diego, USA: Elsevier, 2005. 632 p.
- 4. **Bose B.K.** Modern power electronics and AC drives. New Jersey, USA: Prentice Hall PTR, 2002. 711 p.
- 5. **Demidovich V.B., Rudnev V.I., Komrakova G.D.** Space Change of Eddy Current Power by Induction Heating of Steel Cylinders Second. Nottingham: University of Nottingham, 1994. 189 p.
- 6. Luo F.L., Ye H., Rashid M. Digital power electronics and applications. San Diego, USA: Elsevier, 2005. 408 p.
- 7. **Установки** индукционного нагрева / А.И. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунэр. Л.: Энергоиздат, 1981. 328 с.
- 8. **Ривкин Г.А.** Преобразовательные устройства. М.: Энергия, 1970. 544 с.
- 9. **Нейман Л.Р., Демирчян К.С.** Теоретические основы электротехники. Т. 2. Л.: Энергия, 1981. 533 с.
- 10. **Мещеряков В.Н., Титов С.С.** Энергетические показатели электротехнического комплекса для симметричного индукционного нагрева металлоизделий шарообразной формы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Энергетика. 2015. № 1. С. 54–58.

References

- 1. Titov, S.S. Induktor nepreryvnogo deystviya dlya ravnomernogo osesimmetrichnogo induktsionnogo nagreva izdeliy sharoobraznoy formy «KOMBISPIRAL"» [Continuous operation inductor for uniform axis-symmetric induction heating of spherical products «KOMBISPIRAL»]. Patent RF, no. 148725, 2014.
- 2. Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P. Power Electronics.Converters, application and design.Second edition. New Jersey, USA: A John Wiley and Sons, Inc, 2006. 802 p.
- 3. Rashid, M.H. Power Electronics Handbook, second edition. San Diego, USA: Elsevier, 2005. 632 p.
- 4. Bose, B.K. Modern power electronics and AC drives. New Jersey, USA: Prentice Hall PTR, 2002. 711 p.
- 5. Demidovich, V.B., Rudnev, V.I., Komrakova, G.D. Space Change of Eddy Current Power by Induction Heating of Steel Cylinders Second. Nottingham: University of Nottingham, 1994. 189 p.
- 6. Luo, F.L., Ye, H., Rashid, M. Digital power electronics and applications. San Diego, USA: Elsevier, 2005. 408 p.
- 7. Slukhotsky, A.I., Nemkov, V.S., Pavlov, N.A., Bamuner, A.V. *Ustanovki induktsionnogo nagreva* [Induction Heating Plants]. Leningrad, Energoizdat, 1981. 328 p.
- 8. Rivkin, G.A. *Preobrazovatel'nye ustroystva* [Converting devices]. Moscow, Energiya, 1970. 544 p.
- 9. Neyman, L.R., Demirchyan, K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. T. 2* [Theoretical foundations of electrical engineering. Vol. 2]. Leningrad, Energiya, 1981. 533 p.
- 10. Meshcheryakov, V.N., Titov, S.S. Energeticheskie pokazateli elektrotekhnicheskogo kompleksa dlya simmetrichnogo induktsionnogo nagreva metalloizdeliy sharoobraznoy formy [Energy indicators of electrotechnical equipment for symmetrical induction heating of spherical metal products]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Energetika, 2015, no. 1, pp. 54–58.

Мещеряков Виктор Николаевич,

ФГБОУВПО «Липецкий государственный технический университет»,

доктор технических наук, профессор кафедры электропривода,

e-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru

Meshcheryakov Viktor Nikolayevich,

Lipetsk State Technical University,

Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of the Electric Drive Department,

e-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru

Титов Сергей Сергеевич,

ООО «НПП Система48» (г. Липецк),

кандидат технических наук, генеральный директор,

e-mail:algebra934@yandex.ru

Titov Sergei Sergeyevich,

OOO "NPP Sistema48" (Research and Production Enterprise) (Lipetsk),

Candidate of Engineering Sciences (PhD), CEO,

e-mail:algebra934@yandex.ru

Безденежных Даниил Владимирович,

ООО «НПП Система48» (г. Липецк),

кандидат технических наук, главный инженер,

e-mail: daniil_lipetsk@rambler.ru

Bezdenezhnykh Daniil Vladimirovich,

OOO "NPP Sistema48" (Research and Production Enterprise) (Lipetsk),

Candidate of Engineering Sciences (PhD), CEO,

e-mail: daniil_lipetsk@rambler.ru