

С. В. ДЗЛИЕВ, доктор техн. наук,
А. А. ЗАВОРОТКИН, инженер,
Д. М. ЖНАКИН, аспирант,
К. Е. ПИЩАЛЕВ, инженер,
Ю. Ю. ПЕРЕВАЛОВ, аспирант,
СПБГЭТУ (ЛЭТИ), ООО «ИНТЕРМ»,
г. Санкт-Петербург

Автоколебания при сканирующем индукционном нагреве магнитной стали

Нагрев ТВЧ магнитных металлов характеризуется резким изменением глубины проникновения электромагнитного поля в металл при прогреве поверхностного слоя выше точки Кюри. При этом граница области выделения тепловой энергии перемещается в глубину металла.

При нагреве без движения, когда энергия электромагнитного поля поступает через одну и ту же область поверхности нагреваемого металла, точка Кюри проходится однократно, однако, изотермическая поверхность Кюри, параллельная поверхности детали, неустойчива, и в момент образования разрывается на ряд отдельных областей, границы которых параллельны направлению индуцированного в детали тока. При нагреве стального цилиндра в длинном цилиндрическом индукторе это проявляется в полосатом нагреве [1, 2].

При индукционном нагреве стального цилиндра узким одновитковым индуктором, движущимся вдоль оси цилиндра (сканирующий нагрев), при определенном соотношении мощности нагрева и скорости движения возможно чередование прогретых выше точки Кюри и не прогретых областей.

Так как глубоко прогретая область, выходящая из движущегося индуктора, имеет меньшее сопротивление, чем непрогретая область под индуктором, то ток в металле стягивается в прогретую область, а непрогретая так и не успевает прогреться до точки Кюри за время нахождения под индуктором. По мере удаления прогретой области от индуктора удельная мощность, передаваемая в магнитный металл под индуктором, увеличивается, и эта область вновь успевает прогреваться до температуры Кюри. Источники тепла заглубляются, и удельная мощность на еще не прогретой поверхности перед индуктором снижается. Таким образом, зоны нагрева выше и ниже точки Кюри чередуются при полном отсутствии внешних периодических воздействий, т.е. при стабилизации мощности или тока индуктора и скорости движения.

Автоколебания температуры поверхности цилиндра из магнитной стали при сканирующем индукционном нагреве подтверждены экспериментально. В экспериментах использована автоматизированная установка вертикальной индукционной закалки ИН 600 фирмы «ИНТЕРМ» с транзисторным преобразователем частоты ТГИ100/100 [3].

Для записи параметров режима использована видеокамера и компьютерная система регистрации временных зависимостей электрических параметров – мощности, частоты и выходного тока ТГИ100/100, по значениям которых вычислялись значения активного и индуктивного сопротивления индукционной системы.

Ключевые слова: индукционный нагрев магнитной стали, неустойчивость, автоколебания, бифуркация Андронова-Хопфа на точке Кюри

Эксперимент показал, что при определенном соотношении скорости движения индуктора вдоль цилиндра и мощности нагрева, из-под индуктора выходят поочередно ярко красные и темные полосы. Это свидетельствует о периодическом во времени и пространстве изменении температуры нагрева при полном отсутствии вынуждающих периодических воздействий, т.е. о потере устойчивости процесса нагрева и возникновении автоколебаний (рис.1). Период колебаний в эксперименте составляет примерно одну секунду, а расстояние между нагретыми зонами на поверхности цилиндра – около 10 мм. Температура нагретой светящейся области, образующейся за индуктором, выше точки Кюри, в темной – ниже.

Для изучения условий возникновения автоколебаний при сканирующем индукционном нагреве, их параметров и области существования были проведены исследования на компьютерной модели индукционной системы с учетом нелинейной зависимости магнитной проницаемости стали от напряженности магнитного поля и температуры $\mu(H, T)$, описание которой приведено в [2]. В модели в исходном положении задний торец витка индуктора совпадает с торцом нагреваемого стального цилиндра, а движение со скоростью V и нагрев с постоянной мощностью P начинаются одновременно в нулевой момент времени. Результаты моделирования качественно и количественно совпали с экспериментальными данными.



Рис. 1. Автоколебания температуры под индуктором при сканирующем нагреве цилиндра из магнитной стали

После непродолжительного переходного процесса в системе возбуждаются периодические автоколебания, связанные с нелинейной зависимостью магнитной проницаемости стали при температуре потери магнитных свойств – точке Кюри.

Температурное поле в стальном цилиндре для определенного момента сканирующего нагрева (рис. 2), наглядно свидетельствует о наличии за индуктором двух областей, нагретых выше точки Кюри (желтые области).

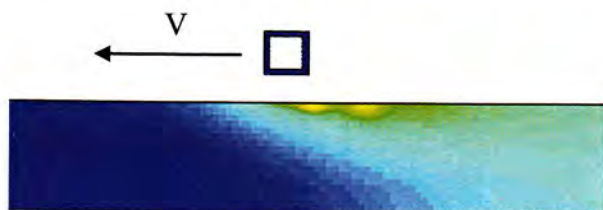


Рис. 2. Расчетное температурное поле в стальном цилиндре при сканирующем индукционном нагреве одновитковым индуктором

На рис. 3 приведены расчетные линии уровня температуры поверхности в координатах (X, t) , где X – координата по оси цилиндра с нулевым значением на левом торце цилиндра, а t – текущее время от начала нагрева. Шкала уровней температуры приведена справа от графика.

На графике проведены две параллельные линии. Правая линия проходит через начало координат и построена по формуле $t = X/V$, где V – скорость движения индуктора вдоль оси цилиндра. Эта линия отмечает в координатах (X, t) положение заднего торца витка индуктора во времени.

Левая линия проведена через точки максимума температуры, которые образуются после выхода из-под индуктора. Расстояние между линиями по оси X определяет расстояние от заднего торца витка индуктора до периодически образующихся наиболее нагретых колец, а по оси t – задержку нагрева полосы до максимальной температуры после выхода из-под заднего торца витка индуктора.

Максимальная температура в данном процессе со-

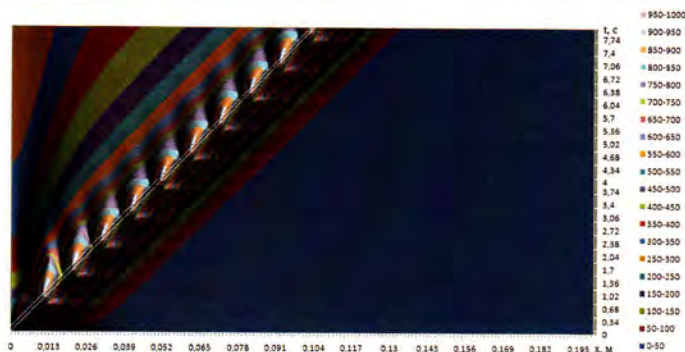


Рис. 3. Расчетные линии уровня температуры поверхности стального цилиндра при сканирующем индукционном нагреве с постоянной мощностью и скоростью

ставляет около 950°C и достигается на расстоянии примерно 2 мм за задним торцом витка индуктора через 0,2 с после выхода из-под индуктора. Длительность существования горячего кольца за индуктором (выше точки Кюри) составляет примерно 1,2 с.

На рис. 4 в трехмерном изображении $T(X, t)$ показано изменение температурного поля на поверхности цилиндра при сканирующем индукционном нагреве. График дает наглядное представление о резких колебаниях температуры в районе точки Кюри, вызванных нелинейностью зависимости $\mu(H)$ стали.

На рис. 5 показано в трехмерном изображении изменение магнитной проницаемости на поверхности стального цилиндра при сканирующем высокочастотном нагреве $\mu(X, t)$.

Видно, что под кольцом индуктора магнитная проницаемость минимальна ввиду насыщения стали сильным магнитным полем. Кроме того, в зонах, где температура поверхностного слоя выше точки Кюри, магнитная проницаемость резко падает до 1, а после остывания вновь восстанавливается.

$\mu(X, t)$ имеет пики на склонах «колодцев», существенно превышающие значения $\mu(X, t)$ в ближайших окрестностях, что физически необъяснимо и очевидно является проявлением численной неустойчивости решения.

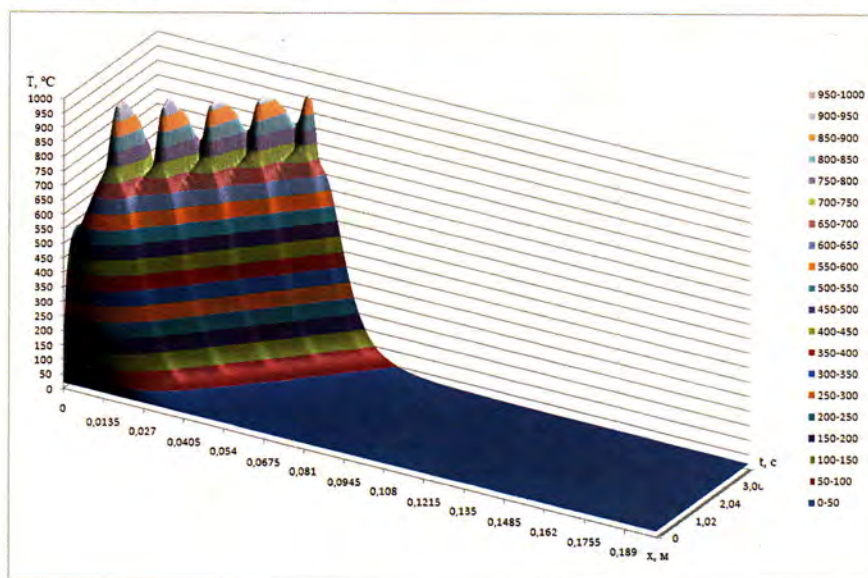


Рис. 4. Изменение температуры поверхности стального цилиндра при сканирующем индукционном нагреве $T(X, t)$

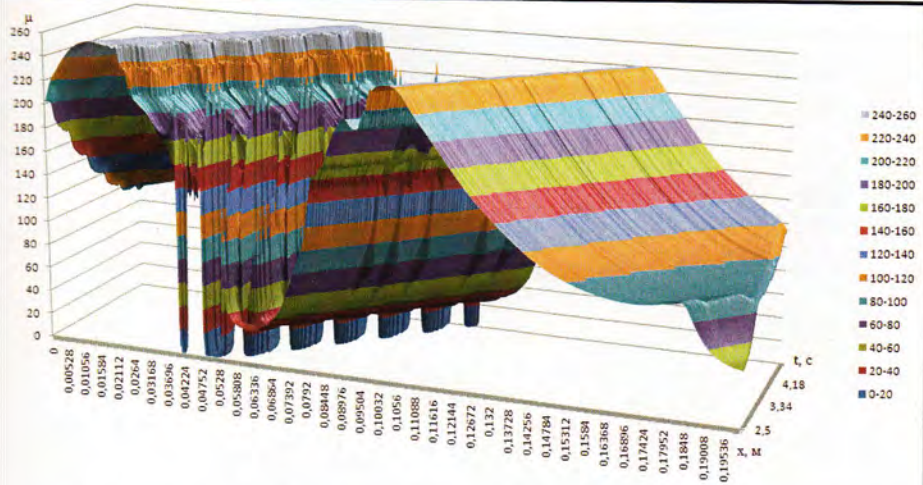


Рис. 5. Изменение $\mu(X, t)$ на поверхности стального цилиндра при сканирующем высокочастотном нагреве (трехмерное изображение)

На рис. 6, где изображены линии уровня $\mu(X, t)$, нанесена прямая линия, показывающая изменение координаты заднего торца витка индуктора в процессе нагрева. Видно, что из-под индуктора периодически выходят зоны, нагретые выше точки Кюри ($\mu=1$) и не нагретые до точки Кюри ($\mu>1$).

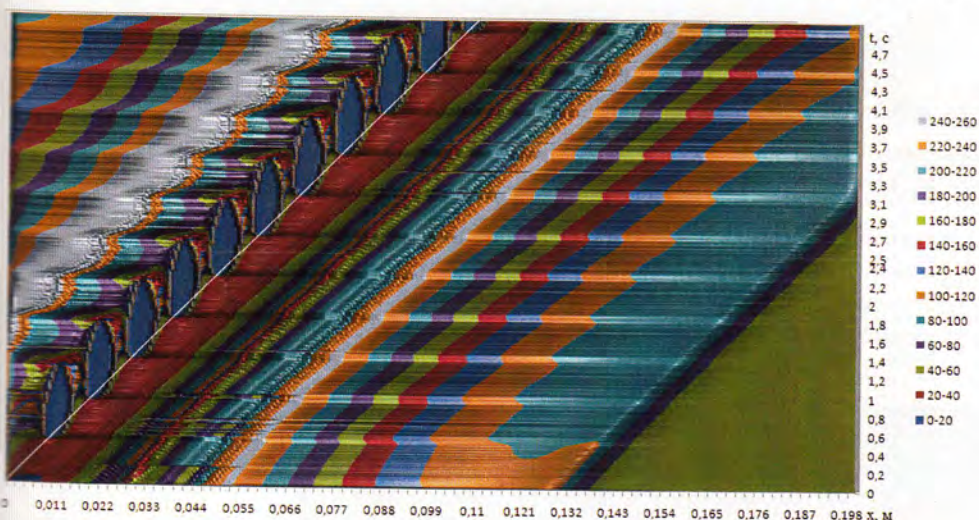


Рис. 6. Линии уровня $\mu(X, t)$ на поверхности стального цилиндра при сканирующем высокочастотном нагреве

На рис. 7 показаны расчетные графики изменения температуры T и скорости изменения температуры dT/dt на поверхности стального цилиндра на выходе из-под индуктора при постоянной скорости движения и мощности. Полная амплитуда колебаний температуры составляет около 200°C (от 700°C до 900°C), причем средняя температура поверхности цилиндра на выходе из-под индуктора выше точки Кюри.

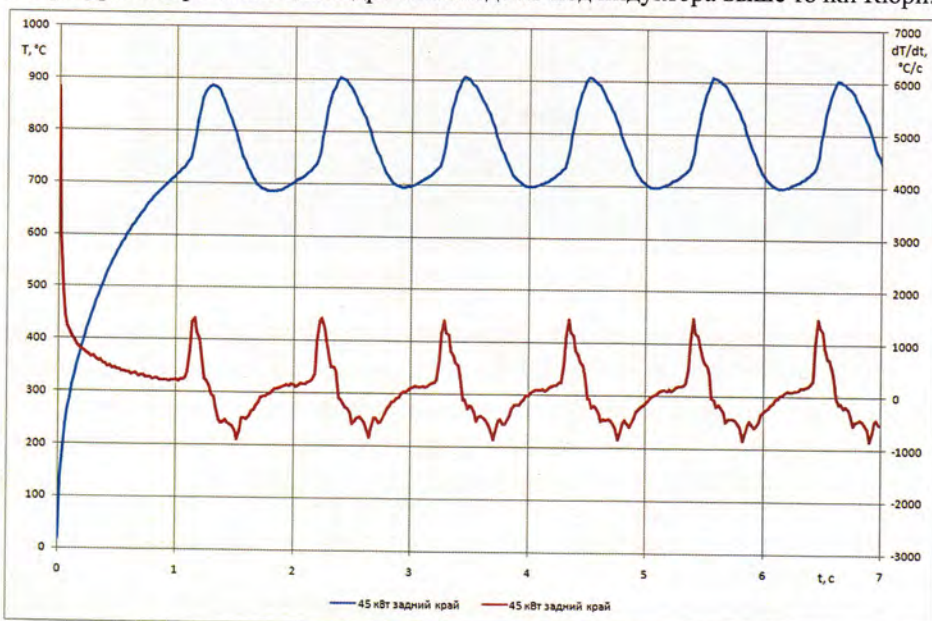


Рис. 7. Автоколебания температуры T и скорости изменения температуры поверхности цилиндра dT/dt на выходе из-под движущегося индуктора при сканирующем нагреве в режиме стабилизации мощности и скорости движения

На рис. 8 показана фазовая траектория этого же процесса $T(dT/dt)$, которая образует предельный цикл.

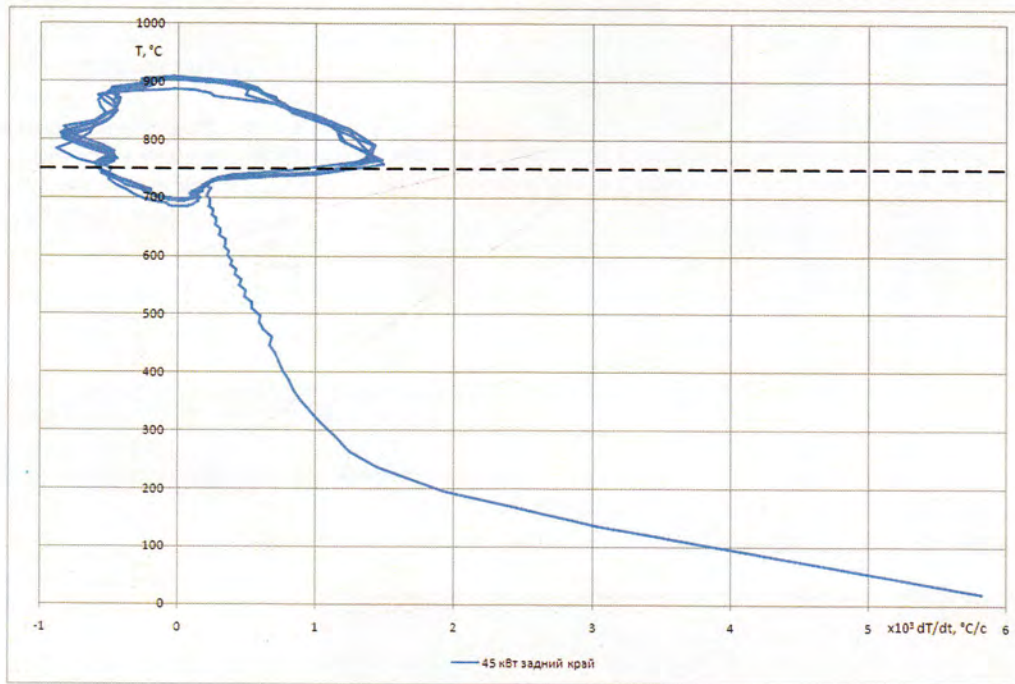


Рис. 8. Фазовая траектория индукционной системы $T(dT/dt)$ при сканирующем нагреве для температуры на выходе из под индуктора

Уменьшение или увеличение мощности при сохранении скорости движения индуктора приводят к устойчивым режимам с температурами соответственно ниже и выше точки Кюри. При снижении мощности нагрева поверхность цилиндра не прогревается до температуры Кюри, индукционная система не попадает в зону резкой нелинейности и автоколебания не возникают (рис. 9).

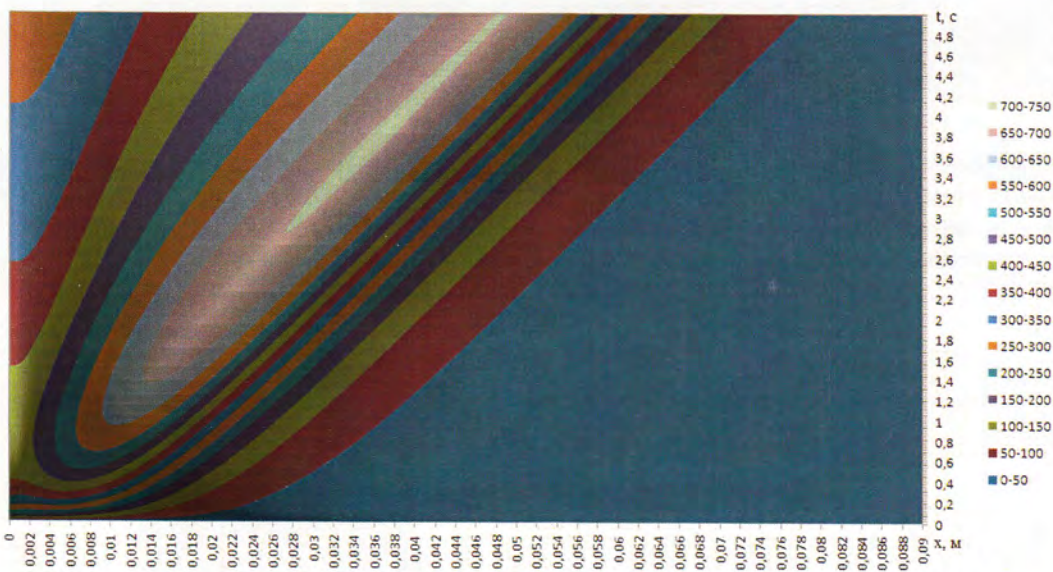


Рис. 9. Расчетные линии уровня температуры поверхности стального цилиндра при сканирующем индукционном нагреве на низкой мощности

При повышении мощности нагрева индукционная система относительно быстро проходит температурный диапазон, близкий к точке Кюри. При прохождении этого диапазона возникают автоколебания, которые исчезают после прогрева всей поверхности цилиндра выше точки Кюри (рис. 10).

Фазовые траектории индукционной системы, соответствующие меньшей и большей мощности нагрева, показаны на рис. 11. Видно, что обе траектории стягиваются к устойчивым точкам, хотя при большей мощности происходит несколько колебаний.

Путем вариации мощности нагрева и скорости движения индуктора определена область потери устойчивости и возбуждения автоколебаний температуры в процессе сканирующего индукционного нагрева в этих координатах.

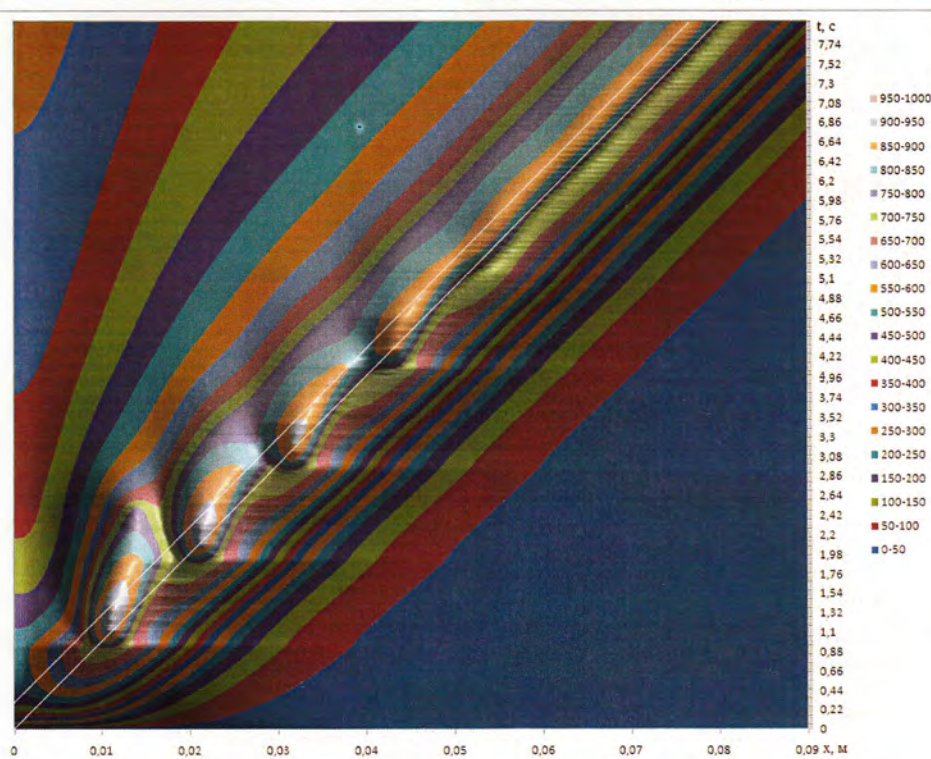


Рис. 10. Расчетные линии уровня температуры поверхности стального цилиндра при сканирующем индукционном нагреве на высокой мощности

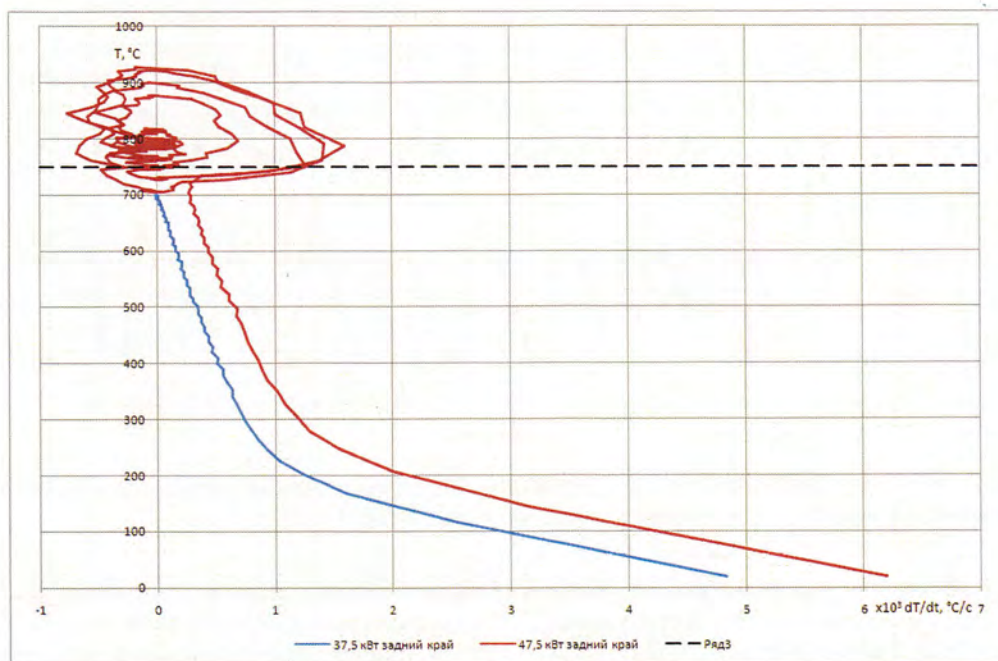


Рис. 11. Фазовые траектории индукционной системы $T(dT/dt)$ при сканирующем нагреве для температуры на выходе из под индуктора при снижении и при увеличении мощности

На границах этой области происходит бифуркация Андронова-Хопфа – потеря устойчивости положения равновесия и образование предельного цикла на фазовой плоскости или наоборот, выход из предельного цикла и переход к устойчивому положению.

Автоколебания в индукционной системе отражаются и на интегральных электрических параметрах процесса.

На рис. 12 показана временная зависимость действующего значения тока индуктора. Амплитуда колебаний тока составляет около 4%.

Колебания активного сопротивления и индуктивности индуктора во времени показаны на рис. 13. Амплитуда колебаний активного сопротивления индуктора составляет 9%, а индуктивности – 17%.

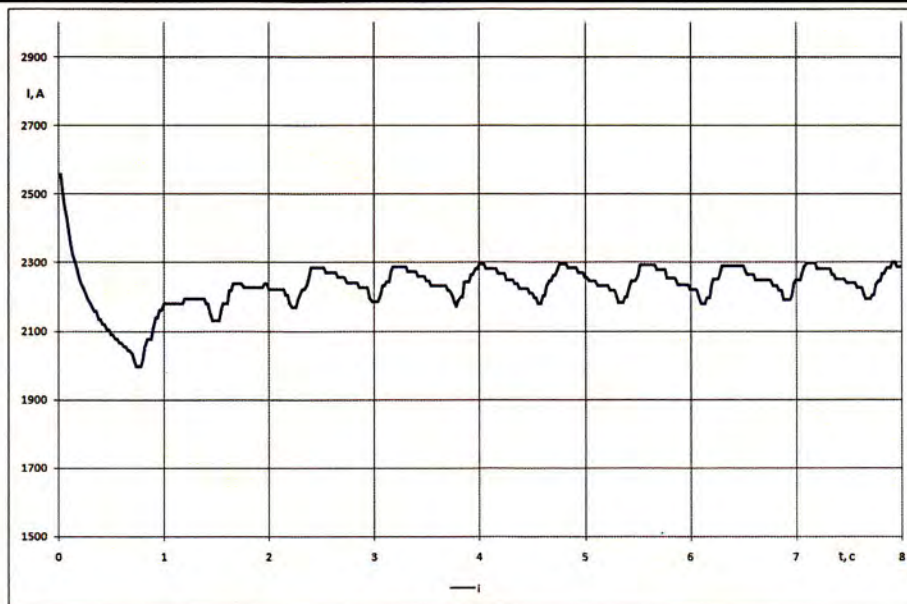


Рис. 12. Ток индуктора в режиме автоколебаний при сканирующем нагреве с постоянной мощностью и скоростью

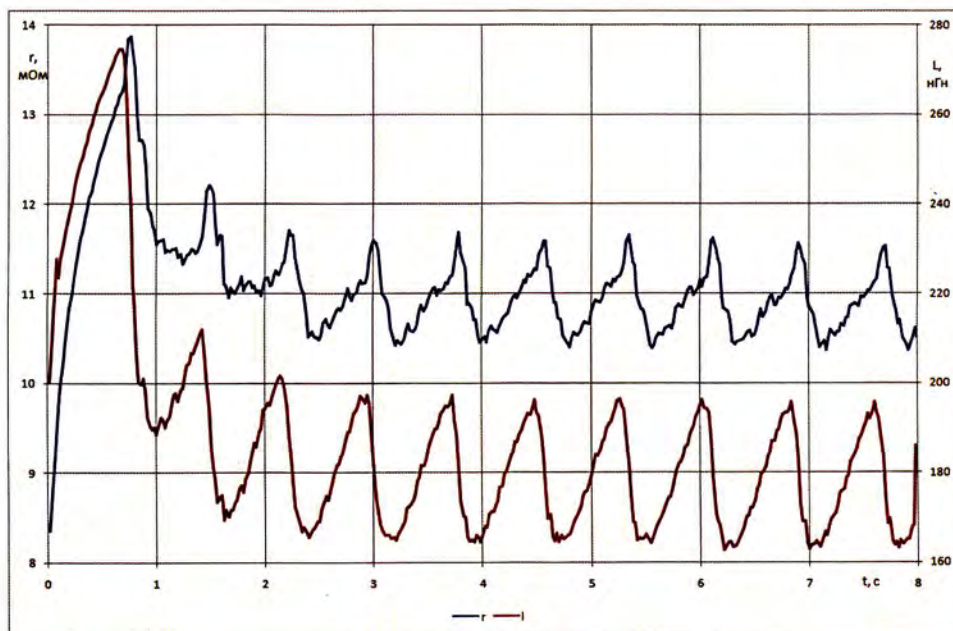


Рис. 13. Активное сопротивление и индуктивность индуктора в режиме автоколебаний при сканирующем нагреве с постоянной мощностью и скоростью

На рис. 14 показан годограф векторов полного сопротивления индуктора Z_i в координатах (R_i , X_i). Годограф начинается в точке $Z=(8,8 \text{ мОм}; 86 \text{ мОм})$, соответствующей началу нагрева холодной детали. Возникновение автоколебаний температуры нагрева приводит к циклическому изменению вектора Z , что отражается замкнутой траекторией годографа. Ценность годографа состоит в том, что Z_i является интегральной характеристикой индукционной системы с распределенными параметрами и позволяет сравнивать режимы нагрева с различными соотношениями скорости V и мощности P .

Автоколебания интегральных величин, которые могут быть измерены или рассчитаны по результатам измерений в ходе процесса нагрева, позволяют идентифицировать неустойчивые режимы и строить алгоритмы управления

нагревом, предотвращающие работу системы индукционного нагрева в неустойчивой области.

Установленные условия возникновения и область существования неустойчивых режимов при сканирующем нагреве цилиндрических деталей из магнитной стали необходимо учитывать при проектировании технологических процессов сканирующей закалки для обеспечения равномерной твердости и глубины закаленного слоя, устранения эффекта спиральной неравномерности при сканирующей закалке с вращением цилиндрической детали.

В настоящее время проведены исследования и готовятся к публикации материалы по моделированию сканирующего нагрева ленты из магнитной стали.

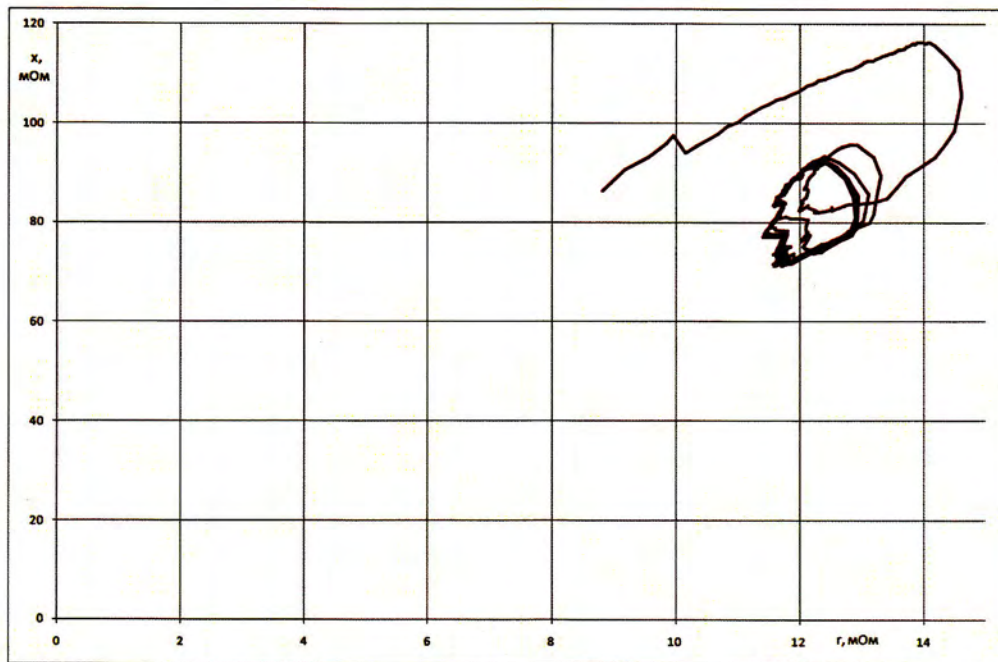


Рис. 14. Годограф вектора сопротивления индуктора при сканирующем нагреве

Список литературы

1. Лозинский М. Г. Промышленное применение индукционного нагрева. М.: АН СССР, 1958. 472 с.
2. С. В. Дзалиев, А. А. Завороткин, Д. М. Жнакин, К. Е. Пищалев, Ю. Ю. Перевалов. Неустойчивость при индукционном нагреве магнитной стали. Индукционный нагрев. 2013. № 1 (23). С. 36...41.
3. www.interm.su

**Требуется разработчик
индукционного оборудования мощностью до 50 кВт**

Контактный телефон:
8 (909) 634-69-60 Евгений Борисович