

УДК 621.365.5

Д. И. Морозов, канд. техн. наук,
Е. С. Руднев, канд. техн. наук,
Д. В. Ушаков

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОГРАММ НАГРЕВА В МНОГОИНДУКТОРНЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

***Аннотация.** Представлен алгоритм определения неизменных мощностей индукторов и их количества в нагревательных комплексах последовательного нагрева при известных размерах индукторов. Для решения задачи используется линейная динамическая модель тепловых процессов в заготовке. При найденных значениях мощностей обеспечивается наиболее быстрый нагрев при соблюдении требований к качеству нагрева.*

***Ключевые слова:** индуктор, мощность, модель, температура, программа нагрева*

Д. І. Морозов, канд. техн. наук,
Є. С. Руднєв, канд. техн. наук,
Д. В. Ушаков

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОГРАМ НАГРІВУ В БАГАТОІНДУКТОРНИХ НАГРІВАЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

***Анотація.** Наведено алгоритм визначення незмінних потужностей індукторів та їх кількості в нагрівальних комплексах послідовного нагріву при відомих розмірах індукторів. Для вирішення задачі використана лінійна динамічна модель теплових процесів в заготовці. При визначених значеннях потужностей забезпечується найшвидше нагрівання при дотриманні вимог до якості нагріву.*

***Ключові слова:** індуктор, потужність, модель, температура, програма нагріву*

D. Morozov, PhD,
E. Rudnev, PhD,
D. Ushakov

THE ALGORITHM OF HEATING PROGRAMS DETERMINATION IN MULTI-INDUCTION HEATING DEVICES

***Absrtract.** An algorithm of determination of constant inductor facilities and quantity in serial heating sets including the known sizes of inductors. A linear dynamic model of thermal processes in a blank is used in order to solve the problem. Having found the facilities values one can provide the most rapid heating in meeting the requirements to heating quality.*

***Keywords:** inductor, facilities, model, temperature, heating program*

Введение. В большинстве отечественных промышленных индукционных нагревательных комплексах нагрев заготовок из медесодержащих сплавов осуществляется по мере их прохождения внутри нескольких индукторов, электропитание которых осуществляется токами промышленной частоты 50 Гц. Возможности регулирования и оптимизации в таких установках ограничены применением индукторов с различным числом витков и переменным шагом намотки, выполнением дискретного переключения ступеней компенсирующей конденсаторной батареи [1]. Получение высоких технологических результатов на этих установках при необходимости нагрева заготовок из разных сплавов, и различных размеров практически не достижимо. Современные комплексы ин-

дукционного нагрева строятся как многоиндукторные, в которых нагреваемая заготовка последовательно перемещается от одного индуктора к другому – многоиндукторные комплексы последовательного нагрева (рис. 1). Возможность регулирования мощности на каждом индукторе позволяет обеспечить нагрев с необходимыми показателями точности и производительности при улучшенной энергоэффективности. Кроме того, обеспечив требуемое распределение мощности нагрева по индукторам можно получить оптимальный процесс нагрева по критериям скорости нагрева, максимального градиента температуры, точности нагрева, минимума потери энергии а также их комбинации [2].

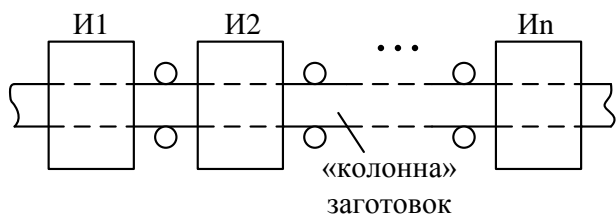


Рис. 1. Схема многоиндукторного комплекса

Таким образом, задача определения распределения мощностей индукторов является основной при проектировании и эксплуатации многоиндукторных установок индукционного нагрева. Данная задача не имеет общего решения из-за различий в конфигурациях мультииндукторных установок и конструкциях индукторов, существенного различия в свойствах материалов нагреваемых заготовок и их форм.

В общем случае данная задача является задачей конструирования многоиндукторного комплекса для конкретной номенклатуры заготовок при этом должны быть решены вопросы количества, конструкции и размеров индукторов, геометрии их расположения.

Задача определения программы нагрева мультииндукторного нагревательного комплекса в целом фактически состоит из подзадач определения процессов изменения мощности каждого индуктора. При этом методы решения задачи определения программы нагрева комплекса обуславливаются регулируемыми возможностями преобразователей питания индукторов, системы управления преобразователем, системой управления температуры заготовки в соответствующем индукторе. Существенно упростить постановку и, соответственно, решение задачи можно заранее задав вид функции изменения мощности каждого из индукторов во времени. Для поиска оптимальных управлений применяются вариационные принципы и итерационные подходы [1].

Приняв, что мощность каждого индуктора во времени неизменно задача сводится лишь к определению этих мощностей, то есть распределения мощности нагревательного комплекса по индукторам. В результате снимается задача поиска процесса изменения

мощности для каждого индуктора в отдельности.

Целью работы является определение количества индукторов и значений мощности каждого индуктора, которая принята неизменяющейся во времени, для многоиндукторного нагревательного комплекса последовательного нагрева.

Материалы исследований. В результате поставленная задача является комплексной: в конструкторском плане требуется определить необходимое количество индукторов; в техническом плане – значения неизменных мощностей каждого индуктора требуемые для нагрева заготовки в соответствии с требуемым качеством. Исходными данными для решения являются:

- конструкция нагревательного комплекса: расстояние между индукторами (L_0);
- конструкция индуктора: длина (L_1), геометрия;
- данные о технологии: производительность Q (т/час) или q (кг/с);
- данные о заготовке; материал (ρ), форма, размеры (D_3);
- требования к нагреву: конечная температура нагрева $T_{нагр\text{треб}}$, максимально допустимая температура на поверхности заготовки $T_{\max\text{доп}}$, максимально допустимый перепад температур между поверхностью и сердцевиной заготовки $\Delta T_{\max\text{доп}}$ (фактически эта температура является косвенным показателем максимального градиента распределения температуры по объему заготовки).

Так как мощность каждого индуктора принята не изменяющиеся во времени, то поставленная задача определения мощностей индукторов и их количества может быть решена итерационным методом. Для этого необходимо, используя тепловую модель заготовки производить моделирование при различных мощностях индукторов для обеспечения заданных требований к нагреву, приближаясь к окончательному ответу – значениям мощностей.

Наиболее точной моделью электро-тепловых процессов системы «индуктор – заготовка» является пространственная конечно-элементная мультифизическая модель, учитывающая электромагнитные и тепловые процессы в заготовке. Однако применение такой модели в поисковом алгоритме требует существенных вычислительных ресурсов и времени, соответственно она не очень пригодна для использования в итерационной процедуре с многократным моделированием. Ускорить поиск решения можно, используя упрощенную линейную модель тепловых процессов в заготовке. Собственно для этой цели авторами была разработана методика и определено описание тепловых процессов системы «индуктор – заготовка» в виде системы линейных дифференциальных уравнений в форме ABCD для четырех точек на заготовке (центральных и крайних на поверхности и оси) на базе результатов моделирования на конечно-элементной модели [3]. Эту модель удобнее всего использовать, реализовав ее в MATLAB, так как в этом пакете можно программно реализовать и алгоритм поиска решения.

Алгоритм решения. При заданной производительности и размере сечения заготовки можно определить скорость движения (V), а так как длина индуктора (принимая все индукторы одинаковой длины) и расстояния между ними заданы, то можно считать, что заданы время нагрева (t_n) и время охлаждения (t_0) при движении заготовок между индукторами. Скорость движения заготовок по линии нагрева считаем постоянной

$$V = \frac{q}{\rho \cdot (\pi D_3^2 / 4)}; t_n = \frac{L_1}{V}; t_0 = \frac{L_0}{V}.$$

Для определения мощности на каждой ступени производим моделирование процесса нагрева (за время t_n) и остывания (за время t_0) заготовки при различных мощностях. Анализируя результаты моделирования, получаем зависимости максимальной температуры, максимальной разницы температур, температура при которой происходит сравнение температур поверхности из середины

заготовки от мощности: $T_{\max}(P)$, $\Delta T_{\max}(P)$, $T_{\text{сравн}}(P)$. По каждой зависимости определяем значение мощности соответствующее заданному параметру нагрева:

- по зависимости $T_{\max}(P)$ определяем P_1 при которой будет $T_{\max \text{ доп}}$ (условие 1);
- по зависимости $\Delta T_{\max}(P)$ – P_2 при которой будет $\Delta T_{\max \text{ доп}}$ (условие 2);
- по зависимости $T_{\text{сравн}}(P)$ – P_3 при которой будет $T_{\text{нагртреб}}$ (условие 3).

Из мощностей P_1 , P_2 , P_3 выбираем минимальную и принимаем ее окончательной для рассматриваемой ступени нагрева (рассматриваемого индуктора). Если этой мощностью будет P_3 (условие 3) то расчёт программы нагрева закончен. Если минимальной окажутся P_1 или P_2 , то требуется еще одна ступень нагрева (еще один индуктор) – процедура определения мощности для следующей ступени повторяется сначала, при этом в качестве начальных значений температуры точек заготовки на следующей ступени принимаются конечные значения температур на предыдущей после цикла нагрева-охлаждение ($t_n + t_0$). Таким образом в итоге определяются значения мощностей индукторов и требуемое их число. Схема описанного алгоритма представлена на рисунке 2.

При программной реализации представленного алгоритма также необходимо учитывать, что требования к нагреву, определяющиеся даже температурами $T_{\max \text{ доп}}$, $\Delta T_{\max \text{ доп}}$, $T_{\text{нагртреб}}$ могут быть противоречивыми. Например, если $T_{\max \text{ доп}}$ очень близкó к $T_{\text{нагртреб}}$, то возможна ситуация, когда при допустимой $T_{\max \text{ доп}}$ на поверхности в конце нагрева выравнивание температур при остывании будет происходить при температуре только меньшей $T_{\text{нагртреб}}$.

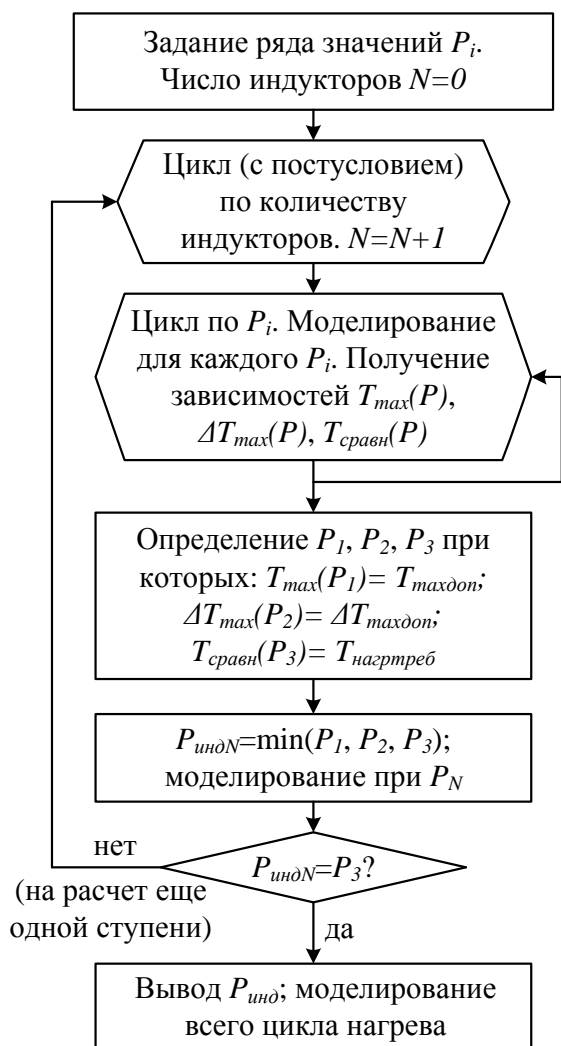


Рис. 2. Схема алгоритма

Или при слишком малой требуемой $\Delta T_{\max \text{ доп}}$ может возникнуть ситуация, когда температура выйдет на периодический режим нагрев-охлаждение, а, значит, не сможет достичь $T_{\text{нагр треб}}$. В этом случае в программной реализации алгоритма необходимо предусмотреть защиту от закливания – принудительный останов программы поиска. Таким образом, технологические требования, задаваемые в алгоритм ($T_{\max \text{ доп}}$, $\Delta T_{\max \text{ доп}}$, $T_{\text{нагр треб}}$), должны быть взаимно согласованы и соответствовать физике нагрева.

Рассмотрим функционирование разработанного алгоритма на конкретном примере определения мощностей. Определим количе-

ство ступеней нагрева (количество индукторов) и мощность нагрева на каждом из них для медной ($\rho = 8,9 \text{ т/м}^3$) цилиндрической заготовки ($D_3 = 220 \text{ мм}$, $L_3 = 500 \text{ мм}$) с производительностью $Q = 4 \text{ т/час}$ ($q = 1,11 \text{ кг/с}$). Длина каждого индуктора и расстояние между ними $L_1 = 250 \text{ мм}$, $L_0 = 200 \text{ мм}$. При такой производительности линейная скорость движения заготовки $V = 3,28 \text{ мм/с}$. Соответственно времена нагрева и паузы будут $t_n = 76,12 \text{ с}$, $t_0 = 60,89 \text{ с}$. Указанные технологические параметры для разных программ нагрева остаются неизменными. Результат – программа нагрева – фактически определяется заданными температурными показателями нагрева. По разработанному алгоритму были получены программы нагрева до температуры $T_{\text{нагр треб}} = 800^\circ\text{C}$ при различных $T_{\max \text{ доп}}$ и $\Delta T_{\max \text{ доп}}$. Полученные результаты приведены в таблице 1 (в скобках рядом со значениями мощностей ступеней указано условие выбора значения мощности), а соответствующие процессы нагрева на рисунке 3.

Как видно из результатов, требования к нагреву существенно влияют на количество индукторов и распределение мощности между ними. Из таблицы 1 видим, что последний индуктор всегда выбирается по условию 3 (условию выхода на заданную температуру). Заслуживающий внимания результат можно выявить при сравнении последних двух программ по табл. 1. В двух случаях получаем четырехэтапные процессы. При малом $\Delta T_{\max \text{ доп}}$ получается программа с работой первых трех ступеней по условию максимально допустимой разности температур (условие 2) (рис. 3,д). При этом мощности этих ступеней практически одинаковые. При нагреве же с $T_{\max \text{ доп}}$ близкой к конечной получаем на каждой из первых трех ступеней нагрев до максимально допустимой температуры (рис. 3,е) – выбор мощности по условию 1. При этом мощность на ступенях уменьшается. Причем соотношения мощностей соседних индукторов практически одинаковые, т.е. распределение мощностей носит характер близкий к экспоненциальному.

Табл. 1. Рассчитанные программы нагрева

Требования. Температуры, °С		Результат		
$T_{\max \text{ доп}}$	$\Delta T_{\max \text{ доп}}$	Количество индукторов	мощности индукторов (на одну заготовку), кВт (условие выбора)	процесс нагрева
1200	600	1	97,3 (3)	рис. 3,а
950	400	2	80 (1); 23,3 (3)	рис. 3,б
950	300	2	63,3 (2); 38,9 (3)	рис. 3,в
950	250	3	52,7 (2); 45,8 (1); 9,0 (3)	рис. 3,г
950	150	4	31,6 (2); 32,0 (2); 32,3 (2); 14,3 (3)	рис. 3,д
850	600	4	71,6 (1); 25,26 (1); 12,07 (1); 6,28 (3)	рис. 3,е

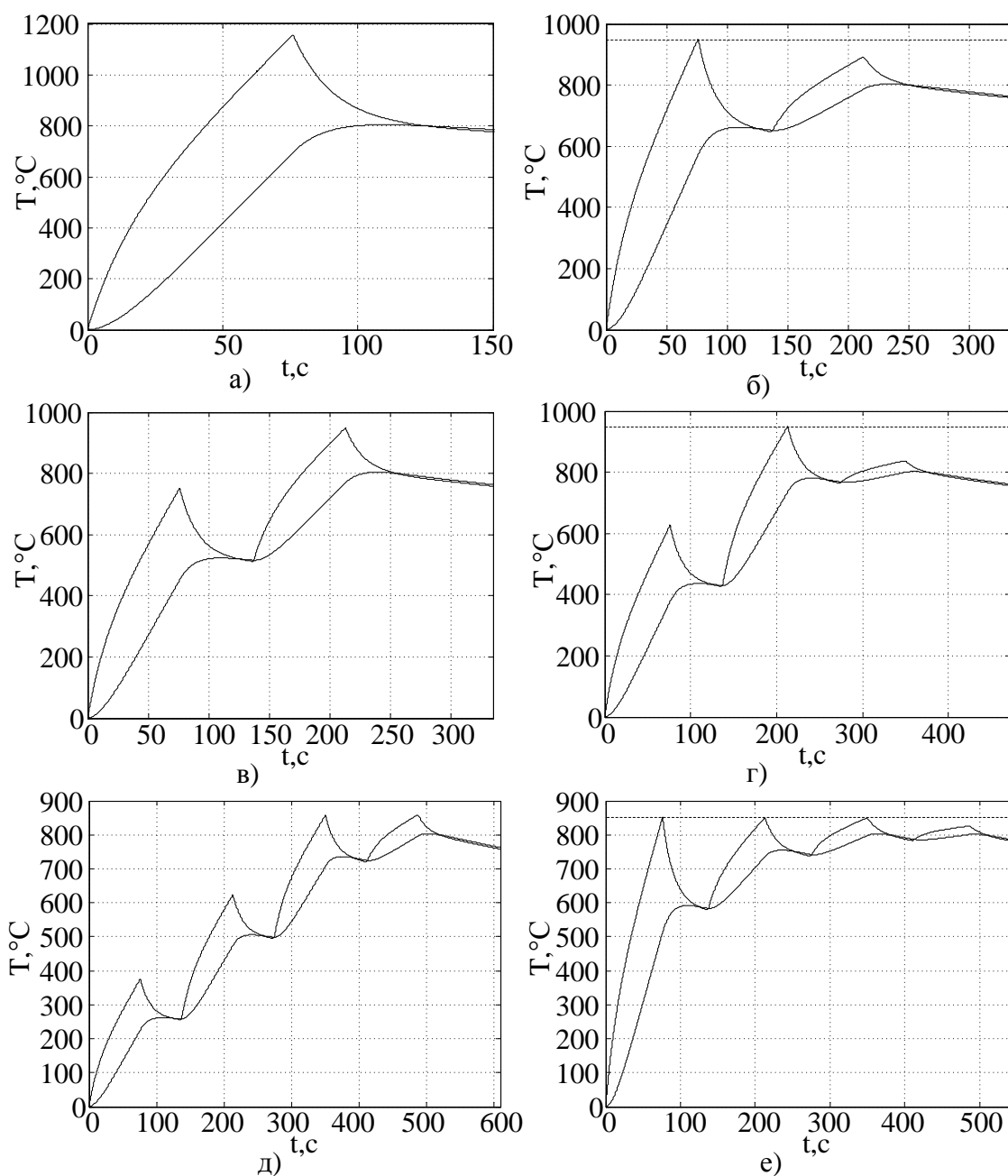


Рис. 3. Процессы изменения температуры при различных программах нагрева

Полученные процессы являются оптимальными по количеству индукторов и, соответственно, времени нагрева при полученном числе индукторов т. к. мощность на каждой ступени (кроме последней) определяется по максимально допустимому показателю температуры нагрева ($T_{\max \text{ don}}$ или $\Delta T_{\max \text{ don}}$). Однако полученное распределение мощностей не является оптимальным с точки зрения энергетики – мощность последнего индуктора не ограничивается температурными показателями нагрева, а за счет перераспределения мощности между индукторами, количество которых определено, имеется возможность изменить энергетические показатели нагревательного комплекса при обеспечении требований к нагреву.

При известной конструкции комплекса поставленную задачу определения мощностей индукторов можно считать решенной. Однако задача проектирования нагревательного комплекса в целом включает в себя и определение длин индукторов и расстояний между ними, тем более у индукторов могут быть разные длины. При оптимизации комплекса в целом, естественно, должны учитываться и энергетические показатели.

Полученные результаты имеют практическое применение. При проектировании нагревательного комплекса, проанализировав возможные программы нагрева, можно установить требуемые мощности индукторов, при которых обеспечиваются необходимые режимы нагрева. Установленное распределение мощностей может быть ориентиром для предварительной настройки на этапе начала эксплуатации нагревательного комплекса.

Вывод. Разработан алгоритм определения количества и мощностей индукторов для установки последовательного нагрева при которых обеспечивается нагрев при заданных ограничениях. Алгоритм применим для случая, когда заданы размеры индукторов и расстояния между ними и при допущении о том, что мощности индукторов постоянны во

времени. Полученные значения могут быть использованы как ориентир для выбора мощности индукторов при проектировании и эксплуатации нагревательного комплекса.

Список использованной литературы

1. Слухоцкий А. Е. Установки индукционного нагрева [Текст] / А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. В. Бамунэр. – Л.: Энергоатомиздат, 1981. – 326 с.
2. Рапопорт Э. Я. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева [Текст] / Э. Я. Рапопорт, Ю. Э. Плешивцева – М.: Наука, 2012. – 309 с.
3. Ушаков В. И. Тепловая линейная модель процесса индукционного нагрева неподвижной цилиндрической заготовки [Текст] / В. И. Ушаков, Д. И. Морозов, И. А. Цодик, Д. В. Ушаков // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ, 2015. – №44(1). – С. 74-80.

Получено 14.11.2015 г.

References

1. Slukhotskii A. E., Nemkov V. S., Pavlov N. A. and Bamuner A. V. Ustanovki induktsionnogo nagreva [Induction heating plants] (1981), Leningrad, USSR (St. Petersburg, Russian Federation), *Energoatomizdat Publ.*, 326 p (In Russian).
2. Rapoport E. Ya. and Pleshivtseva Yu. E. Optimal'noe upravlenie temperaturnymi rezhimami induktsionnogo nagreva [Optimal temperature control induction heating] (2012), Moscow, Russian Federation, *Nauka Publ.*, 309 p (In Russian).
3. Ushakov V. I., Morozov D. I., Tsodik I. A. and Ushakov D. V. Teplovaya lineinaya model' protsessa induktsionnogo nagreva nepodvizhnoi tsilindricheskoi zagotovki [Thermal linear model of the induction heating process a motionless cylindrical workpiece] (2015), *Sbornik nauchnykh trudov DonGTU*, Alchevsk, Ukraine, Vol. 44(1), pp. 74-80 (In Russian).



Морозов
Дмитрий Иванович,
к.т.н., доцент
заведующий кафедрой
автоматизированных
электромеханических
систем Донбасского гос-
ударственного техниче-
ского университета
(г. Лисичанск)
dimorozov2@yandex.ua
моб.: (095) 849-11-73



Руднев
Евгений Сергеевич
к.т.н., доцент кафедры
автоматизированных
электромеханических
систем Донбасского гос-
ударственного техниче-
ского университета
(г. Лисичанск)
rudnev_evgen@mail.ru
моб.: (050) 682-38-58



Ушаков
Дмитрий
Владимирович
Аспирант кафедры
Электрические машины
и аппараты Донбасского
государственного
технического
университета
(г. Лисичанск)