

УДК 621.792

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРУЗКИ ИНДУКТОРОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАЗБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ**©Романов С. В.***Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про автора:**

Романов Сергій Валерійович: ORCID: 0000-0003-3770-1241; svrom@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Объектами нагрева в индукторе при тепловой разборке чаще всего являются охватывающие детали, имеющие форму цилиндра с центральным посадочным отверстием (втулки, ролики, кольца, полумуфты, шестерни, бандажи и т.п.). Основная задача при проектировании индуктора – обеспечить качественный нагрев до заданной температуры посадочной поверхности, имеющей, как правило, цилиндрическую форму.

Электрические параметры индукторов, предназначенных для тепловой разборки соединений с натягом, в большой степени зависят от активного сопротивления нагрузки. Величина этого сопротивления во многом определяется конструктивными особенностями нагреваемых объектов.

На основе анализа существующих способов расчёта характеристик электрических машин, предложена методика, учитывающая специфику индукционного оборудования.

Сравнение результатов расчёта с экспериментальными исследованиями показало, что предложенная методика расчёта применима для различных способов замыкания магнитной системы индуктора.

Ключевые слова: индуктор; индукционный нагрев; активное сопротивление; магнитная система.

Романов С. В. «Особливості розрахунку активного опору навантаження індукторів, призначених для розбирання з'єднань з натягом».

Об'єктами нагріву в індукторі при тепловій розбиранні найчастіше є деталі що охоплюють, які мають форму циліндра з центральним посадковим отвором (втулки, ролики, кільця, напівмуфти, шестерні, бандажі тощо). Основна задача при проектуванні індуктора - забезпечити якісний нагрів до заданої температури посадкової поверхні, що має, як правило, циліндричну форму.

Електричні параметри індукторів, призначених для теплового розбирання з'єднань з натягом, великою мірою залежать від активного опору навантаження. Величина цього опору багато в чому визначається конструктивними особливостями об'єктів, що нагріваються.

На основі аналізу основних способів розрахунку характеристик електричних машин, запропонована методика, що зважає на специфіку індукційного устаткування.

Порівняння результатів розрахунку з експериментальними дослідженнями показало, що запропонована методика розрахунку застосовна для різних способів замикання магнітної системи індуктора.

Ключові слова: індуктор; індукційний нагрів; активний опір; магнітна система.

Romanov S. “Peculiarities of calculation of active resistance of load of inductors designed for disassembling of connections with tension”.

The objects of heating in the inductor during thermal disassembly are most often the female parts having the shape of a cylinder with a central seating hole (bushings, rollers, rings, half couplings, gears, bandages, etc.). The main task in the design of the inductor is to provide a high-quality heating up to a given temperature of the landing surface, which, as a rule, has a cylindrical shape.

The electrical parameters of the inductors intended for thermal disassembly of the interference connections depend to a large extent on the active resistance of the load. The magnitude of this resistance is largely determined by the structural features of the heated objects.

On the basis of the analysis of the basic methods for calculating the characteristics of electric machines, a technique is suggested that takes into account the specificity of the induction equipment.

Comparison of calculation results with experimental studies showed that the proposed calculation technique is applicable for various methods of closing the magnetic system of the inductor.

Key words: inductor; induction heating; active resistance; magnetic system.

1. Постановка проблемы

Проектируя индукторы для разборки соединений, приходится учитывать необходимость размещения в рабочем пространстве нагревателя всего соединения в собранном состоянии и приспособлять конфигурацию магнитопроводов и обмоток возбуждения, к форме наружной поверхности охватывающих деталей.

В простейшем случае соединение представляет собой гладкую втулку с наружным диаметром D , насаженную на вал (рисунок 1).

Магнитопроводы и обмотка возбуждения охватывают наружную поверхность втулки, у которой наблюдается наибольшая плотность тока и выделяется основная часть тепла. Нагрев посадочной поверхности соединения происходит за счёт теплопроводности.

2. Анализ последних исследований

Активное сопротивление нагрузки r_{2M} в соответствии с [1] определяется по формуле:

$$r_{2M} = 1,37 \frac{\pi D^2 \rho_2}{b_2 \Delta_2}. \quad (1)$$

где D – диаметр наружной поверхности детали;

Δ_2 – глубина проникновения тока;

b_2 – ширина посадочной поверхности;

ρ_2 – удельное сопротивление материала детали. В процессе нагрева сопротивление r_{2M} не остаётся постоянным т.к. удельное сопротивление с ростом температуры возрастает

$$\rho_t = \rho_0 + \alpha(t-t_0), \text{ Ом}\cdot\text{м}, \quad (2)$$

где ρ_0 – начальное сопротивление, Ом·м ;

α – температурный коэффициент.

Для стали $\rho_0 = 2 \cdot 10^{-7}$ Ом·м; $\alpha = 0,005$.

Втулка может иметь на наружной поверхности выступы, например, шлицы или зубья. Выступы и впадины шлицев находятся на различных расстояниях от проводников с током обмотки возбуждения, и условия их нагрева различны – выступы шлицев нагреваются сильнее, чем впадины.

В литературе [2] указывается, что при токе низкой частоты, когда глубина проникновения тока Δ сопоставима с толщиной шлица, плотность тока в нём падает. Примерное распределение тока в сечении детали приведено на рисунке 2.

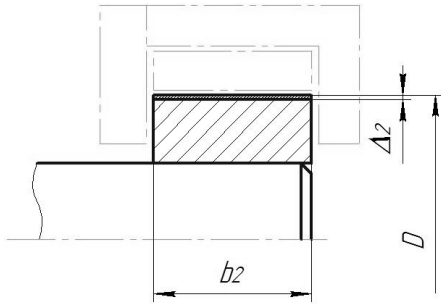


Рис. 1 – Схема нагрева детали в индукторе для разборки соединения

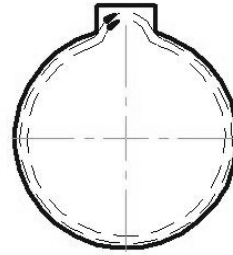


Рис. 2 – Распределение тока по сечению детали со шлицем при низких частотах

Выступы на кривой распределения тока согласовываются, расплываются. Поэтому расчёт r_{2M} ведут по внутреннему диаметру шлицевого соединения.

Аналогично, по диаметру окружности впадин ведут расчёт, когда снимаемая деталь представляет собой зубчатое колесо.

$$r_{2M} = 1,37 \frac{\pi D_i \rho_2}{b_2 \Delta_2} \quad (3)$$

Снимаемая деталь может иметь ступенчатую форму, состоять из двух цилиндров, имеющих разную ширину и диаметр (рисунок 3).

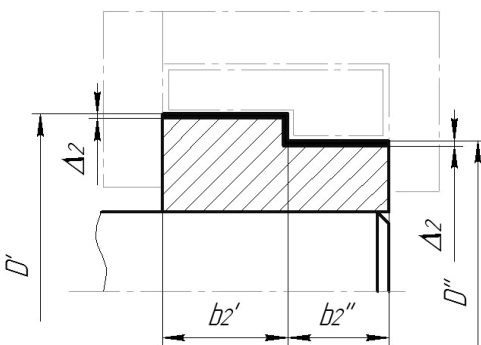


Рис. 3 – Схема нагрева в индукторе для съема детали ступенчатой формы

Если при этом и обмотка возбуждения выполнена ступенчатой, так что между её проводниками и поверхностью детали сохраняются на всех участках одинаковые воздушные зазоры, можно принять

$$r_{2M} = r_{2M}' + r_{2M}'' = 1,37 \frac{\pi \rho}{\Delta_2} \left(\frac{D'}{b_2'} + \frac{D''}{b_2''} \right) \quad (4)$$

Если же обмотка возбуждения намотана в форме цилиндра постоянного диаметра, воздушный зазор между проводником и поверхностью детали будет на разных участках различным, и расчёт r_{2M} сильно усложняется. Найденную по вышеприведенной формуле его величину можно принять лишь как ориентировочное, приближённое значение.

3. Основная часть

Установить, насколько значения активного сопротивления r_{2M} , полученные аналитическим путём отражают реальный процесс прохождения тока в индукционном нагревателе, можно только экспериментально. Для получения фактических значений r_{2M} , которые имели место в реально работающих нагревателях, были использованы материалы лабораторных испытаний, проводившихся в лаборатории «Термосборка» кафедры ИТМ и СП УИПА.

В ходе этих испытаний исследовалась динамика процесса нагрева (изменение температуры по времени) по показаниям термопар, вмонтированных в разных точках поверхности нагрева детали, а также электрические параметры индуктора: напряжение на его зажимах, сила тока в индукторе i_u и в сети, потребляемая мощность P_2 .

Поскольку полезная активная мощность индуктора $P_2 = i_u^2 r_{2M} W^2$, и число витков обмотки возбуждения W известно, можно определить фактическое значение активного сопротивления

$$r_{2M\phi} = \frac{P_{2\phi}}{i_{u\phi}^2 W^2} \quad (5)$$

Характеристики нагреваемых объектов и индукционных нагревательных установок приведены в таблице 1.

Указаны также число витков обмотки возбуждения и электрические параметры (напряжение U_ϕ , сила тока в индукторе $i_{u\phi}$ и мощность, потребляемая индуктором, $P_{2\phi}$). По этим данным было подсчитано фактическое значение $r_{2M\phi}$. Для сопоставления в таблицу 1, наряду с $r_{2M\phi}$, были внесены значения активного сопротивления r_{2M} . Расчёт r_{2M} в соответствии с проводился в следующем порядке.

Удельная мощность в нагреваемом слое считалась постоянной и определялась по фактической мощности $P_{2\phi}$.

$$P_0 = \frac{P_{2\phi} \cdot 10^3}{\pi d b_2}, \frac{Bm}{m^2}, \quad (6)$$

где $P_{2\phi}$ – мощность, кВт;

d, b_2 – диаметр и длина нагреваемого слоя (если глубина проникновения тока Δ_2 отсчитывается от наружной поверхности детали, вместо d подставляется D, m).

По удельной мощности p_0 подсчитывается параметр $H_e^2 \sqrt{\mu_e}$ (H_e – действующее значение напряжённости магнитного поля в нагреваемом слое, А/м), и по кривой намагничивания $H_e^2 \sqrt{\mu_e} = f(H_e)$ определялась относительная магнитная проницаемость материала детали μ .

Тогда в соответствии с [2] можно найти глубину проникновения тока Δ_2 , и активное сопротивление r_{2M} :

$$\Delta_2 = 503 \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu f}}, \quad r_{2M} = 1,37 \frac{\pi d \rho_2}{b_2 \Delta_2}. \quad (7)$$

Поскольку удельное сопротивление стали зависит от температуры $\rho_2 = f(t)$, для чистоты опыта было бы желательно рассчитывать Δ_2 и r_{2M} для той же температуры, при которой во время экспериментальных исследований проводилось снятие показаний ваттметра (т.е. в начале или в конце процесса нагрева). Но в ходе лабораторных испытаний установок момент снятия показаний приборов не фиксировался, и установить его не представлялось возможным. Поэтому были подсчитаны два расчётных значения r_{2M} – для $\rho_2 = 2 \cdot 10^{-7}$ Ом·м (начального) и при ρ_{2t} – при конечной температуре нагрева.

Таблица 1 – Результаты лабораторных испытаний индукторов

№	Деталь	Индуктор	Число витков W	Опытные данные			$\Gamma_{2\text{эф}}$, Ом	$\Gamma_{2\text{м}}$, Ом	Примечание
				U, В	$I_{\text{н}}$, А	P_2 , кВт			
I	Узел шестерня – вал под разборку. $d = 140$ мм; $\sigma = 120$ мм; $D = 195$ мм	с радиально расположенными магнитопроводами, $n = 4$; магнитная цепь замкнута.	65	363	156	19,5	$1,93 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-4}$ $1,24 \cdot 10^{-4}$	$\rho_2 = \rho_{20}$ $\Delta_{\text{Зрасч}} = \Delta_2$ $\Delta_{\text{Зрасч}} = 1,5\Delta_2$
II	Бандаж под сборку $d = 900$ мм, $D = 1050$ мм, $\sigma = 140$ мм	с радиально расположенными магнитопроводами, $n = 12$; в магнитной цепи зазор	30	387	260	58	$1,93 \cdot 10^{-4}$ $8,9 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^{-4}$ $10,6 \cdot 10^{-4}$	$\rho_2 = \rho_{20}$ $\Delta_{\text{Зрасч}} = \Delta_2$
III	Шестерня. Нагрев под сборку $d = 90$ мм; $\sigma = 120$ мм	C-образный магнитопровод с замыкающим сердечником	90	366	235	26,5	$0,59 \cdot 10^{-4}$	$0,84 \cdot 10^{-4}$ $0,56 \cdot 10^{-4}$	Расчет по $\rho_2 = \rho_{20}$, $\Delta_{\text{Зрасч}} = \Delta_2$ $\Delta_{\text{Зрасч}} = 1,5\Delta_2$
IV	Бандаж. Нагрев под сборку. $d = 1060$ мм, $D = 1260$ мм, $v = 143$ мм	с радиально расположенными магнитопроводами, $n = 12$; магнитная цепь замкнута	32 27	378 384	270 390	57 84	$7,6 \cdot 10^{-4}$ $7,8 \cdot 10^{-4}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$ $8,0 \cdot 10^{-4}$	} при $\Delta_{\text{Зрасч}} = 1,5\Delta_2$
V	Бандаж. Нагрев под сборку $d = 480$ мм, $D = 600$ мм, $v_2 = 115$ мм	радиально расположенные магнитопроводы, $n = 6$; магнитная цепь с разрывом (зазор)	36	378	290	45	$4,13 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$ $4,2 \cdot 10^{-4}$	$\rho_2 = \rho_{20}$, $\Delta_{\text{Зрасч}} = \Delta_2$ $\Delta_{\text{Зрасч}} = 1,5\Delta_2$
VI	Шестерня под сборку $d = 138$ мм, $D = 355$ мм, $\sigma_2 = 100$ мм	с двумя ветвями магнитопроводов и пронизывающим сердечником	2·35=70	360	130	13,5	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$\rho_2 = \rho_{20}$, $\Delta_{\text{Зрасч}} = \Delta_2$

В [1] имеется указание на то, что при сравнительно сильных магнитных полях электромагнитная волна проникает в сталь до глубины $1,457 \Delta_2 \approx 1,5\Delta_2$. В отдельных случаях r_{2M} подсчитывалось и для значения $1,5\Delta_2$. Результаты расчётов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Параметры индуктора для расчета активного сопротивления нагрузки r_{2M}

№ объекта нагрева	Масса m_0 , кг	Диаметр d (D), мм	Длина b_2 , мм	Мощн. Полезная P_2 , кВт	Удельная мощность P_0 , Вт/м ²	$H_c^2 \sqrt{\mu}$	Магн. прониц. μ	Удельн. сопрог. ρ_2 , Ом·м	Глубина проникн. Δ_2 , м	Активн. сопрог. r_{2M} , Ом	Примеч.
I	40,5	$D_i=195$	120	19,5	$2,84 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^{10}$	18	$2 \cdot 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$1,86 \cdot 10^{-4}$	$\Delta_{2расч} = \Delta_2$
II	284	$D=1050$	140	58	$1,25 \cdot 10^5$	$1,45 \cdot 10^{10}$	28	$2 \cdot 10^{-7}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$10,6 \cdot 10^{-4}$	$\Delta_{2расч} = \Delta_2$
III	17,6	$d=90$	120	26,5	$7,8 \cdot 10^5$	$9,05 \cdot 10^{10}$	12	$2 \cdot 10^{-7}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$	$0,84 \cdot 10^{-4}$ $0,56 \cdot 10^{-4}$	$\Delta_{2расч} = \Delta_2$ $\Delta_{2расч} = 1,5\Delta_2$
IV	403	$D=1260$	143	57 84	$1,01 \cdot 10^5$ $1,49 \cdot 10^5$	$1,17 \cdot 10^{10}$ $1,72 \cdot 10^{10}$	30 25	$2 \cdot 10^{-7}$ $2 \cdot 10^{-7}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$ $6,3 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$ $8,0 \cdot 10^{-4}$	$\Delta_{2расч} = \Delta_2$ $\Delta_{2расч} = 1,5\Delta_2$
V	91,6	$D=600$	115	45	$2,6 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^{10}$	20	$2 \cdot 10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$ $4,21 \cdot 10^{-4}$	$\Delta_{2расч} = \Delta_2$ $\Delta_{2расч} = 1,5\Delta_2$
VI	65,5	$d=138$	100	13,5	$3,1 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^{10}$	18	$2 \cdot 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$\Delta_{2расч} = \Delta_2$

Относительная погрешность расчёта активного сопротивления нагрузки индуктора (расхождение между $r_{2Mф}$ и r_{2M} выраженное в процентах) приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Расхождение между величинами $r_{2Mф}$ и r_{2M}

Объект нагрева	$\frac{r_{2M} - r_{2Mф}}{r_{2Mф}}, \%$		Сила тока i_u , А
	$\Delta_{2расч} = \Delta_2$	$\Delta_{2расч} = 1,5\Delta_2$	
I	-3,6	-35,7	156
II	+19,1	-20,6	290
III	+42,3	-5,1	235
IV	+72	+14,5	270
V	+52,5	+1,7	290
VI	-1,8	-35	130

Выводы

Как видно из таблицы 3, теоретическим расчётом можно было получить величину активного сопротивления r_{2M} , близкую к фактическому значению, с погрешностью не более $\pm 20\%$. Но для I и VI объектов наименьшее расхождение между r_{2M} и $r_{2Mф}$ наблюдалось, когда в качестве расчётного было принято $\Delta_{2расч} = \Delta_2$, а для III, IV и V объектов – когда было принято в расчётах $\Delta_{2расч} = 1,5\Delta_2$. Для II объекта погрешность в обоих случаях получалась примерно одинаковой.

В таблице 3 приведены также значения силы тока в индукторах i_u . В объектах III, IV и V индукторы работали при более сильных токах, которые могли образовать более сильные поля, чем в объектах I и VI. Это могло способствовать увеличению толщины токопроводящего слоя в нагреваемой детали до $1,5\Delta_2$.

Список использованных источников:

1. Андреев Г. Я. Тепловая сборка колесных пар / Г. Я. Андреев. – Харьков : Изд-во ХГУ, 1965. – 227 с.
2. Слухоцкий А. Е. Индукторы для индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, С. Е. Рыскин. – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.
3. Сборка и монтаж изделий машиностроения : справочник : в 2-х т. Т.1: Сборка изделий машиностроения / под ред. В. С. Корсакова, В. К. Замятина. – М. : Машиностроение, 1983. – 480 с.

References

1. Andreyev, G 1965, *Teplovaya sborka kolesnykh par*, Izdatelstvo KhGU, Kharkiv.
2. Slukhotskiy, A & Ryskin, S 1974, *Induktory dlya induktsionnogo nagreva*, Energiya, Leningrad.
3. Korsakov, V & Zamyatin, V 1983, *Sborka i montazh izdeliy mashinostroyeniya. Spravochnik, vol. 1 Sborka izdeliy mashinostroyeniya*, Mashinostroyeniye, Moskva.

Стаття надійшла до редакції 24 квітня 2017 р.