

И.С. ВАРШАМОВА, м.н.с., НТУ "ХПИ", Харьков
В.С. ЛУПИКОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАТУШКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА КОМПЕНСАТОРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ НАГРЕВЕ ДО УСТАНОВИВШЕГОСЯ СОСТОЯНИЯ

Розроблено спрощена методика моделювання температури в об'ємі симетричної циліндричної котушки на основі базової залежності сталої температури в її осьовому центральному перерізі уздовж відрізка радіальної осі. Проведена оцінка зміни опору котушки від температури нагріву власним струмом.

Разработана упрощенная методика моделирования температуры по объему симметричной цилиндрической катушки на основе базовой зависимости установившейся температуры в ее осевом центральном сечении вдоль отрезка радиальной оси. Проведена оценка изменения сопротивления катушки от температуры нагрева собственным током.

Введение. Анализ уровней внешнего магнитного поля низковольтных распределительных устройств показывает, что для решения проблем электромагнитной совместимости и магнитной экологии необходимо уменьшение уровня поля примерно в 1000 раз [1, 2]. В этой связи ужесточаются и требования к электромагнитам компенсаторам (ЭК) по точности воспроизводимого магнитного поля МП. Эти ЭК являются исполнительными элементами параметрических систем автоматической компенсации (САК) и их токи формируются как линейные комбинации токов силовой цепи распределительного устройства. Традиционные методы проектирования ЭК [3-6] на основе заданной величины магнитного поля ограничены инженерной погрешностью (1-5 %), что не позволяет в принципе получить эффективность компенсации более 100 единиц. Кроме того, при этом не учитывается нагрев ЭК в процессе длительной работы в составе распределительного устройства. Качественный анализ показывает, что независимо от способа питания ЭК (от источника тока либо источника напряжения [3]) его сопротивление меняется в процессе нагрева собственным током. Погрешность известных ЭК сильно зависит от метода их настройки. В настоящее время настройка САК ведется на специализированном стенде [7] при установившейся температуре нагрева. В реальных же

условиях эксплуатации распределительного устройства его температурный режим может существенно отличаться от принятого при настройке на стенде. В этой связи актуальной становится задача разработки методики оценки сопротивления катушки ЭК магнитного поля при длительном нагреве в составе распределительного устройства.

Цель работы – оценка величины изменения сопротивления катушки ЭК в процессе длительного нагрева собственным током.

Задачи, решаемые в настоящей работе:

1. Моделирование распределения температуры в осевом сечении катушки ЭК.
2. Получение аналитических соотношений для сопротивления катушки с учетом распределения температуры по ее объему.
3. Оценка изменения сопротивления катушки ЭК при длительном нагреве до установившейся температуры.

Допущения:

1. Катушка греется только собственным током.
2. Передача тепла осуществляется только теплопроводностью.
3. Режим нагрева – установившийся.
4. Рассматривается режим нагрева катушки номинальным током.
5. Катушка питается от источника тока.
6. Катушка рассматривается как цилиндр с равномерным распределением обмоточного провода по сечению.
7. Среда, в которой распространяется тепло, однородна и изотропна.

Распределение температуры в установившемся режиме нагрева. Для сложных процессов, к которым относится передача теплоты теплопроводностью, при установлении зависимостей между величинами удобно воспользоваться методами математической физики. С этих позиций протекание процесса передачи тепла рассматривается не во всем изучаемом пространстве, а в элементарном объеме вещества в течение бесконечно малого интервала времени. Связь между величинами, участвующими в передаче теплоты теплопроводностью, устанавливается дифференциальным уравнением, которое описывает тепловой баланс катушки [8, 9]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{c\gamma}, \quad (1)$$

где T – превышение температуры в элементарном объеме катушки над температурой окружающей среды; t – время; λ – удельная теплопроводность; r – радиус удаления элементарного объема катушки от оси; φ –

полярный угол; z – координата элементарного объема, совпадающая с направлением вдоль оси катушки; q – плотность внутренних источников теплоты; c – удельная теплоемкость; γ – плотность материала катушки.

Потери тепла в проводнике рассчитываются по формуле:

$$q = \frac{P}{V} = \frac{I \cdot U}{V}, \quad (2)$$

где P – активная мощность потерь в катушке; I – ток в катушке; U – напряжение на катушке; $V = \pi \cdot l \cdot (r_2^2 - r_1^2)$ – объем катушки; l – длина катушки; r_1, r_2 – внутренний и наружный радиусы катушки.

Граничные условия. Особенностью такой модели, представленной соотношениями (1) и (2), является то, что получение однозначного распределения температуры зависит от точности описания температуры и теплового потока на граничной замкнутой поверхности, охватывающей исследуемый объект (граничных условий) и начальных условий процесса. В тоже время, при получении оценок можно обойтись менее точными данными о распределении температуры и теплового потока, что позволяет пользоваться упрощенными инженерными методиками. В данной работе распределение тепла в объеме катушки получается на основании распределения температуры в центральном сечении вдоль радиальной оси катушки и принятом законе распределения температуры вдоль слоя одинакового радиуса.

Предлагаемая методика упрощенного получения распределения температуры по объему катушки включает:

- расчет функции распределения температуры в точках радиуса катушки в центральном сечении;
- определение минимальной температуры этого распределения;
- задание температур на всех внешних участках поверхности катушки равной минимальной температуре в центральном сечении;
- определение постоянных коэффициентов параболического закона распределения температуры вдоль слоя катушки.

На рис. 1 показан схематический вид обмотки катушки (а), картина распределения температур по осевому сечению катушки (б) и распределение максимальной температуры вдоль выбранного слоя катушки (в).

Здесь использованы обозначения: r, z – радиальная и осевая координаты цилиндрической катушки; 0 – начало цилиндрической системы координат, расположенное в геометрическом центре катушки; r_1, r_2 – внутренний и наружный радиусы катушки; l – длина катушки; r_i, dr – радиус и толщина i -го слоя; $T_i(r)$ – функция распределения температуры вдоль слоя.

Расчет функции распределения температуры в точках радиуса катушки в центральном сечении катушки проведен по методике [10]:

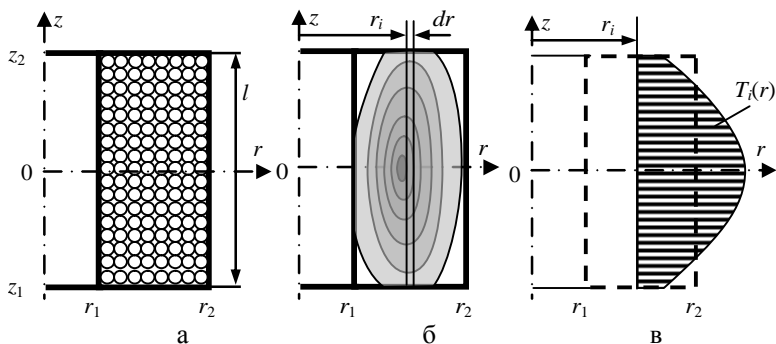


Рис. 1.

$$T(r) = \frac{q}{2k} \left(-\frac{r^2}{2} + \frac{p-g}{m-n} \ln(r) + \frac{gm-pn}{m-n} \right), \quad (3)$$

где k – коэффициент теплопроводности катушки в радиальном направлении; h_1, h_2 – коэффициенты теплоотдачи с внутренней и внешней боковой поверхности цилиндрической катушки; p, g, m, n – коэффициенты, определяемые в зависимости от r_1, r_2, h_1, h_2 и k :

$$p = \frac{r_2^2}{2} + \frac{k \cdot r_2}{h_2}; \quad g = \frac{r_1^2}{2} - \frac{k \cdot r_1}{h_1}; \quad m = \ln(r_2) + \frac{k}{h_2 \cdot r_2}; \quad n = \ln(r_1) - \frac{k}{h_1 \cdot r_1}.$$

Радиус r_{max} точки с максимальной температурой равен:

$$r_{max} = \sqrt{\frac{p-g}{m-n}}. \quad (4)$$

В качестве примера проведен расчет распределения температуры при стационарном нагреве катушки электромагнита компенсатора [11]. Исходные данные для расчета: $l = 0,25$ м – высота катушки; $r_1 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $r_2 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м; $k = 0,44$ Вт·м^{-1,0}·°С⁻¹; $h_1 = 30$ Вт·м^{-2,0}·°С⁻¹; $h_2 = 170$ Вт·м^{-2,0}·°С⁻¹; $I = 2$ А – ток в катушке; $U = 3,8$ В – падение напряжения на катушке. По результатам расчетов получено распределение превышения температуры T вдоль радиуса катушки в центральном сечении, приведенное на рис. 2.

Максимальная величина превышения температуры рассчитанная по соотношению составила $T_{max} = 119$ °С в точке центрального сечения с радиусом (4) $r_{max} = 16,4$ мм. Минимальная температура $T_{min} = 101,3$ °С.

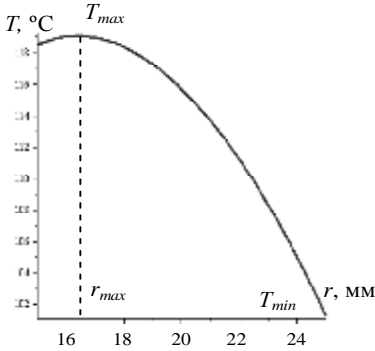


Рис. 2

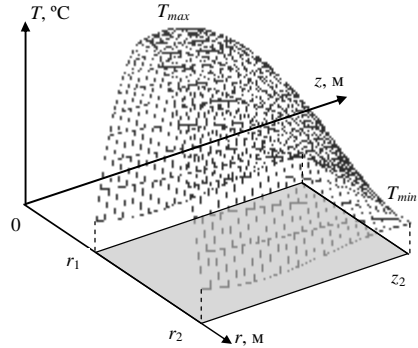


Рис. 3.

Используя зависимость (3) проведено построение парабол, определяющих распределения температур по слоям катушки вида:

$$T_n(z) = a_n z^2 + b_n, \quad (5)$$

где n – номер слоя катушки, $n = (\overline{1, N})$; a_n, b_n – коэффициенты параболы для функции распределения температуры в n -м слое катушки.

С использованием численных методов получены аппроксимированные кривые $Tr(z)$ и $Tn(z)$ по соотношениям (3) и (5). Значения коэффициентов парабол приведены в табл. 1.

На основе данной аппроксимации получено распределение температуры по сечению катушки, приведенное на рис. 3.

Таблица 1 – Коэффициенты парабол, аппроксимирующих распределение температуры по слоям катушки.

Номер слоя, n	a_n	b_n
1.	-15788,91	118,49
2.	-16279,75	119,03
3.	-16135,09	118,87
4.	-15395,45	118,06
5.	-14094,21	116,65
6.	-12259,15	114,65
7.	-9913,68	112,09
8.	-7077,69	109,00
9.	-3768,22	105,40
10.	0	101,30

Половина сечения катушки показана расположенной в горизонтальной плоскости, а распределение температуры в этом сечении пока-

зано в виде сетчатой поверхности. Центральное сечение этой поверхности соответствует кривой радиального распределения температуры на рис. 2.

Зависимость сопротивления катушки от температуры при установившемся нагреве. Сопротивление катушки в "холодном" состоянии можно определить по формуле:

$$R = R_1 w, \quad (6)$$

где w – число витков катушки; R_1 – сопротивление одного витка катушки (среднего).

Учитывая необходимость получения с повышенной точностью зависимости сопротивления катушки от температуры, расчет сопротивления проводился по формуле [12], ограниченной квадратичным членом:

$$R_1 = \rho_0 \left(1 + \alpha T_1 + \beta T_1^2 \right) \frac{l_1}{S}, \quad (7)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление материала (меди) витка; α, β – температурные коэффициенты сопротивления; T_1 – температура одного витка; l_1 – средняя длина одного витка катушки; S – сечение меди витка.

В случае неравномерного распределения температуры по объему катушки предлагается определить сопротивление витка с учетом средней температуры нагрева катушки, которая может быть определена по формуле [13]:

$$T_{\bar{n}} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} \int_{z_1}^{z_2} T(r, \theta, z) \cdot r \cdot dr \, d\theta \, dz}{\int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} \int_{z_1}^{z_2} r \cdot dr \, d\theta \, dz}, \quad (8)$$

где T_c – превышение средней температуры витка катушки.

Для заданного распределения температуры по объему катушки расчетная величина превышения средней температуры T_c витка составила:

$$T_{\bar{n}} = 109,98 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (9)$$

С учетом превышения средней температуры (8), (9) и зависимости сопротивления витка (7), соотношение (6) для сопротивления катушки принимает вид:

$$R = \rho_0 w \frac{l_1}{S} (1 + \alpha T_c + \beta T_c^2) = R_0 (1 + \alpha T_c + \beta T_c^2), \quad (10)$$

где R_0 – сопротивление катушки в "холодном" состоянии.

Оценка изменения сопротивления катушки. На основании соотношения (10) проведен расчет сопротивления катушки для двух вариантов. Первый вариант, сопротивление в "холодном" состоянии; второй вариант – когда зависимость сопротивления от температуры ограничено линейным членом с коэффициентом пропорциональности $\alpha = 0.00424 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; третий вариант – учитывается квадратичная зависимость сопротивления от температуры: $\alpha = 0.00424 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\beta = 4,53 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^2$.

Для характеристики увеличения сопротивления катушки в нагретом состоянии относительно "холодного" вводится коэффициент k_T , величина которого определяется с учетом соотношения (10):

$$k_T = \frac{R}{R_0} = (1 + \alpha T_c + \beta T_c^2), \quad (11)$$

Результаты расчета сопротивления катушки по соотношению (11) для двух вариантов приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Расчетная величина сопротивления катушки в нагретом состоянии

Вариант расчета	Сопротивление, Ом	Коэффициент k_T
1	5,184	1
2	7,609	1.468
3	7,630	1.472

Как видно из табл. 2, сопротивление катушки электромагнита существенно меняется при ее нагреве собственным током, увеличивается почти в 1,5 раза. Этот факт необходимо учитывать при стендовой настройке ЭК, либо в системе компенсации предусматривать температурную коррекцию параметров ЭК. Как показывает расчет, влияние квадратичного коэффициента зависимости сопротивления катушки от температуры примерно равно 0,27 % и в первом приближении им можно было бы пренебречь. Для крупногабаритных ЭК эта величина может достигать 1 % и в этом случае для высокоточных систем компенсации необходимо учитывать и квадратичный коэффициент зависимости сопротивления от температуры.

Выводы:

1. Разработана упрощенная методика моделирования распределения температуры по объему симметричной цилиндрической катушки.

В качестве основной используется характеристика распределения установившейся температуры в осевом центральном сечении вдоль отрезка радиальной оси. Значения установившейся температуры на всех поверхностях катушки за исключением внутренней цилиндрической поверхности принимаются равными минимальному значению превышения температуры на этом отрезке, а закон распределения температур по радиальным слоям принимается квадратичным с максимумом параболы, соответствующем основной характеристике распределения установившейся температуры.

2. Предложено аналитическое соотношение для расчета функции изменения сопротивления катушки в зависимости от температуры нагрева собственным током в установившемся режиме нагрева.

3. Результаты исследований рекомендованы для использования при производстве электромагнитов компенсаторов высокоточных систем компенсации внешнего магнитного поля электрооборудования.

Список литературы: 1. *Розов В.Ю.* Системы автоматической компенсации внешнего магнитного поля энергонасыщенных объектов: Автореф. дис. ...доктора техн. наук / Институт электродинамики НАН Украины. – К.: 2002. – 37 с. 2. *Salinas E.* Mitigation of Power-Frequency Magnetic Fields with Applications to Substation and Other Parts of the Electric Network / E. Salinas // Department of Electric Power engineering, Chalmers University of Technology. – Gothenburg. – 2001. – 149 p. 3. *Коваленко А.П.* Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1975. – 248 с. 4. *Kildishev A., Volokhov S.A., Erisov A.V.* A local shipboard telechromagnetic compensator // MARELEC'99Коваленко. 2nd International conference on marine electromagnetics. Ensieta, Brest, France, 5-7 July1999. – P. 453-458. 5. *Розов В.Ю., Волохов С.А., Ерисов А.В.* Электромагнитный компенсатор магнитных полей технических объектов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – №15. – С. 191-197. 6. *Пелевин Д.Е.* Оптимизация параметров электромагнитов управления магнитным полем // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – №3. – С. 31-34. 7. *Крюкова Н.В., Машнев А.Є., Петров С.В., Пелевин Д.Е., Шубцов В.Е.* Улучшение однородности магнитного поля в рабочей области магнитоизмерительного стенда // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. – № 4. С. 51-53. 8. *Гордон А.В., Сливинская А.Г.* Электромагниты постоянного тока. М., Энергоиздат, 1960. – 446 с. 9. *Нащокин В.В.* Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., испр. и доп. – М: Высш. школа, 1980. – 469 с. 10. *Аронов Р.Л.* Методы расчетов тепловых процессов в активных материалах электротехнических конструкций. – Харьков: ГОНТИ, 1938. – 140 с. 11. *Клименко Б.В.* Асимметричный нагрев обмоток в стационарном режиме // Изв. вузов. Сер. Электромеханика. – 1971. – № 9. – С.

994-1001. **12. Таев И.С.** Электрические аппараты. Общая теория. – М., Энергия, 1977. – 272 с. **13. Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Перев. со второго американского перераб. изд. – М.: Наука, 1974. – 832 с.



Варшамова Ирина Сергеевна, м.н.с. кафедры электрических аппаратов НТУ "ХПИ". Защитила диплом магистра в 2006 г. с отличием.

Научные интересы связаны с магнетизмом технических объектов, физическими полями электрических аппаратов.



Лупиков Валерий Сергеевич, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера, диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1973, 1987 и 2004 гг. С 1973 по 1998 гг. работал в области магнетизма технических объектов. Заведующий кафедрой "Электрические аппараты" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2005 г.

Научные интересы связаны с проблемами электромагнитной совместимости технических средств, магнетизмом технических объектов, магнитной левитацией, физическими полями электрических аппаратов.

Поступила в редколлегию 28.08.2010