

ПОСТРОЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИНДУКТОРА, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ЛЬДА С ПРОВОДОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НАЗЕМНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

На основі електромагнітного способу боротьби з обледенінням проводів контактної мережі наземного міського електротранспорту розроблена фізична модель індуктора, а саме функціональна схема, електрична схема підключення та загальний вигляд діючого макета індуктора. Розглянута методика проведення лабораторних досліджень діючого макету індуктора. Наведені результати нагріву проводу контактної мережі.

На основе электромагнитного способа борьбы с обледенением проводов контактной сети наземного городского электротранспорта разработана физическая модель индуктора, а именно функциональная схема, электрическая схема подключения и общий вид. Рассмотрена методика проведения лабораторных исследований действующего макета индуктора. Приведены результаты нагрева проводника контактной сети.

A physical model of inductor including the functional diagram, the electrical diagram and the general view, on the basis of electromagnetic method of de-icing contact wires of the surface municipal electric transport is developed. The technique of laboratory research for working model of the inductor is considered. The results of heating the conductor contact system are presented.

Разработка физической модели индуктора проводилась на основе представления реального процесса нагрева проводов электрической сети различного сечения. При этом принимались во внимание принципы действия и работа электротехнических устройств, необходимых для нагрева проводника в электромагнитном поле. Конечной целью физического моделирования было проведение исследования, направленного на подтверждения графика зависимости коэффициента тепловой диссипации от частоты электромагнитного поля индуктора. Функциональная схема физической модели индуктора приведена на рис. 1.

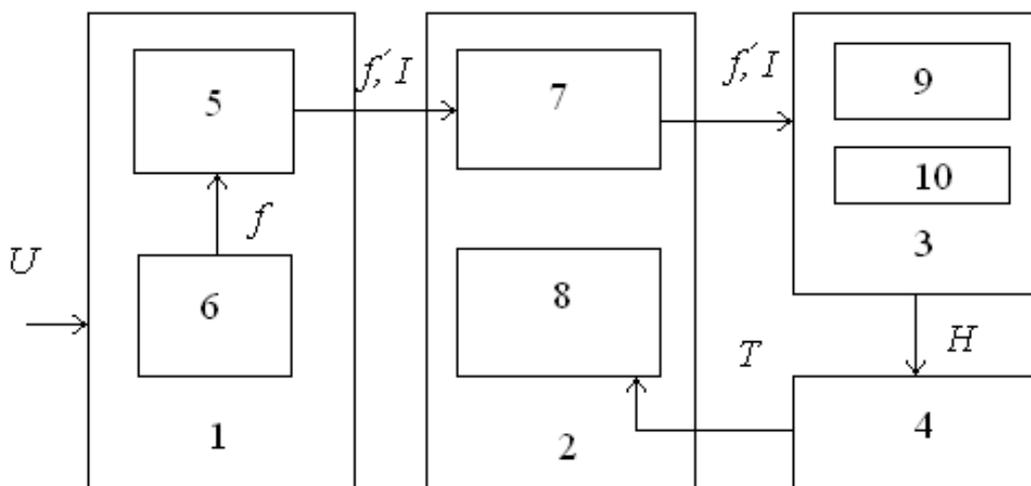


Рис. 1. Функциональная схема физической модели индуктора

На рис. 1 цифрами обозначено: 1 – генерирующий модуль, 2 – измерительный модуль, 3 – индуктор, 4 – объект исследований, 5 – усилитель мощности, 6 – генератор частоты, 7 – блок измерения электрических величин, 8 – блок измерения температуры, 9 – магазин конденсаторов, 10 – обмотка индуктора с магнитопроводом из феррита.

Блок-схема физической модели индуктора состоит из следующих основных элементов (модулей):

1. Генерирующий модуль.
2. Измерительный модуль.
3. Индуктор.
4. Объект исследований.

В первый модуль входит генератор частоты (в данном эксперименте использовался генератор типа «ГЗ-111»), а также усилитель мощности (тип «Барк У-001»). Генерирующий модуль берет питание от внешнего источника (сеть переменного напряжения 220 В). Генератор частоты выдает на усилитель напряжение с заданной исследователем частотой. После усиления сигнал подается непосредственно на индуктор через измерительный модуль.

Измерительный модуль состоит из двух частей:

- блок измерения электрических величин, а именно напряжение на входе индуктора, потребляемая мощность, ток и частота тока в обмотке индуктора;
- блок измерения температуры.

Блок измерения электрических величин позволяет достигнуть в цепи обмотки индуктора резонанс напряжений, о необходимости которого будет сказано ниже. Блок состоит из амперметра, ваттметра и частотомера (в данном эксперименте используется универсальный измерительный прибор типа DT-9208-A).

Блок измерения температуры основан на базе универсального измерительного прибора типа DT-838 с термопарой.

Индуктор состоит из двух главных составляющих:

- феррита, на который намотана обмотка. Причем феррит имеет воздушный зазор, в который непосредственно и помещается провод контактной сети;
- магазин конденсаторов с переключателями тонкой и грубой настройки.

Необходимость последовательного подключения батареи конденсаторов обусловлена тем, что обмотка индуктора имеет значительное индуктивное сопротивление при малом активном сопротивлении, а значит ток в обмотке оказывается минимальным при остальных равных условиях.

Следовательно, чтобы увеличить ток в обмотке индуктора (при тех же энергетических затратах), а значит и напряженность магнитного поля в воздушном зазоре, в который помещается проводник, необходимо внести емкостное сопротивление равное индуктивному по величине.

Таким образом, при последовательном подключении конденсаторов будет наблюдаться резонанс напряжений и ток в цепи обмотки индуктора оказывается максимальным, а эффект нагрева проводника контактной сети городского электротранспорта при прочих равных условиях – оптимальным.

Настройка на резонанс напряжений осуществляется с помощью блока измерения электрических величин непосредственно через генерирующий модуль (включая тот или иной конденсатор различной емкостью на выбранной исследователем частоте).

Действующий макет индуктора представлен на рис. 2.



Рис. 2. Действующий макет индуктора

Объектом исследования является проводник контактной сети городского наземного электротранспорта (в нашем случае – троллейбуса). В эксперименте были проведены исследования на трех разных диаметрах (2 мм, 4 мм и 8 мм).

Электрическая схема подключения индуктора представлена на рис. 3.

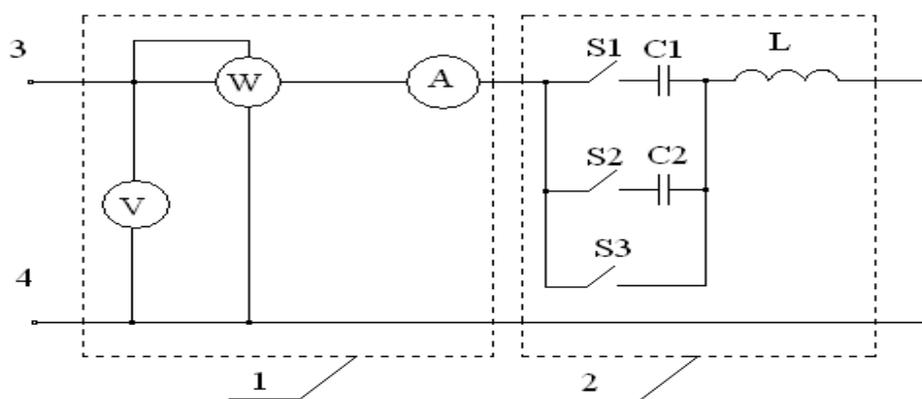


Рис. 3. Электрическая схема подключения индуктора

На рис. 3 обозначено: 1 – Блок измерения электрических величин (без частотомера), 2 – индуктор, W – ваттметр, V – вольтметр, A – амперметр, C1 и C2 – соответственно части магазина конденсаторов для грубой и плавной настройки резонанса напряжений, S1 и S2 – соответственно переключатели грубой и плавной настройки, S3 – переключатель, отключающий магазин конденсаторов, L – индуктивность обмотки индуктора на ферритовом сердечнике, 3 и 4 – зажимы, к которым подключается выход от усилителя мощности.

Выполнение эксперимента осуществляем по следующему алгоритму:

1. Собираем схему подключения индуктора согласно рис. 3. Перед сборкой схемы необходимо убедиться в работоспособности отдельных составляющих ее элементов.
2. Включаем генератор и усилитель, выставляем нужную частоту (в диапазоне от $0,5$ кГц до 20 кГц).
3. Настроить резонанс напряжений с учетом постоянства мощности (в нашем случае 16 Вт).
4. Записываем показания приборов (частота и ток обмотки) и отключаем индуктор, охлаждая провод контактной сети, расположенный в воздушном зазоре магнитопровода индуктора, до начальной температуре.
5. Охладив проводник, включаем генератор и одновременно таймер. Снимаем показания блока измерения температуры через определенные промежутки времени (рекомендуется в начале нагрева снимать показания через $5-10$ с, а к концу нагрева интервал увеличивают до $1-2$ мин) с общей продолжительностью проведения эксперимента на одной частоте $6-7$ мин (дальнейший нагрев не целесообразно осуществлять, так как существенного изменения температуры не наблюдается).
6. После снятия показаний, эксперимент повторяют на следующей частоте, повторяя п.3-5.
7. Завершив исследования на одном диаметре переходят на следующий и повторяют п.3-5.
8. Отключаем приборы, а проводник охлаждаем во избежании самовозгорания или плавки посторонних предметов.

В таблице 1 приведены результаты нагрева проводника диаметром 2 мм.

Для определения частотных характеристик макета индуктора, а именно оптимальной частоты электромагнитного поля, в котором помещены образцы проводника контактной сети различного диаметра, необходимо аппроксимировать кривые нагрева.

Ближайшей функцией нагрева по [1] является уравнения следующего вида:

$$T = a - be^{-\frac{t}{c}}, \quad (1)$$

где a , b , c – параметры уравнения; t – время.

Для нахождения параметров уравнения (1) воспользуемся методом наименьших квадратов, согласно которого сумма квадратов отклонений расчетных и опытных значений температур будет минимальной.

В нашем случае для диаметра проводника $d = 2$ мм и частоты электромагнитного поля индуктора $f = 1,88$ кГц параметры соответственно равны $a = 58$, $b = 38$, $c = 20,39$. На рис. 4 приведен график зависимости нагрева полученные экспериментально (исходные данные приведены в табл. 1) и вычисленные (базовое уравнение 1) для диаметра проводника $d = 2$ мм и частоты $f = 1,88$ кГц.

Таблица 1

Нагрев провода (T , °C) во времени в зависимости от частоты электромагнитного поля при диаметре проводника $d = 2$ мм

Время t , с	5	10	15	20	30	45	60	90
Частота f , кГц (Ток I , А)	120	150	180	210	240	270	300	360
1,88 (3,90)	30	35	39	44	50	53	55	56
	56	57	57	58	58	58	59	60
3,90 (3,00)	33	47	58	68	85	103	115	129
	136	139	141	142	142	143	143	143
4,40 (2,90)	34	51	61	71	90	109	122	136
	143	146	147	148	148	149	149	149
6,17 (2,45)	36	52	68	82	103	125	140	155
	162	167	168	168	168	168	168	169
8,62 (1,95)	38	54	69	85	107	130	146	164
	172	176	178	179	180	180	181	181
12,39 (1,70)	39	56	76	90	115	140	161	183
	192	196	198	199	200	201	201	202
15,95 (1,50)	40	59	76	91	119	147	170	195
	206	212	215	216	217	217	218	218
18,75 (1,30)	36	53	69	83	108	134	153	179
	191	196	200	201	202	203	203	203

Примечания: 1. Начальная температура нагрева 20°C ; 2. Электрическая мощность 16 Вт.

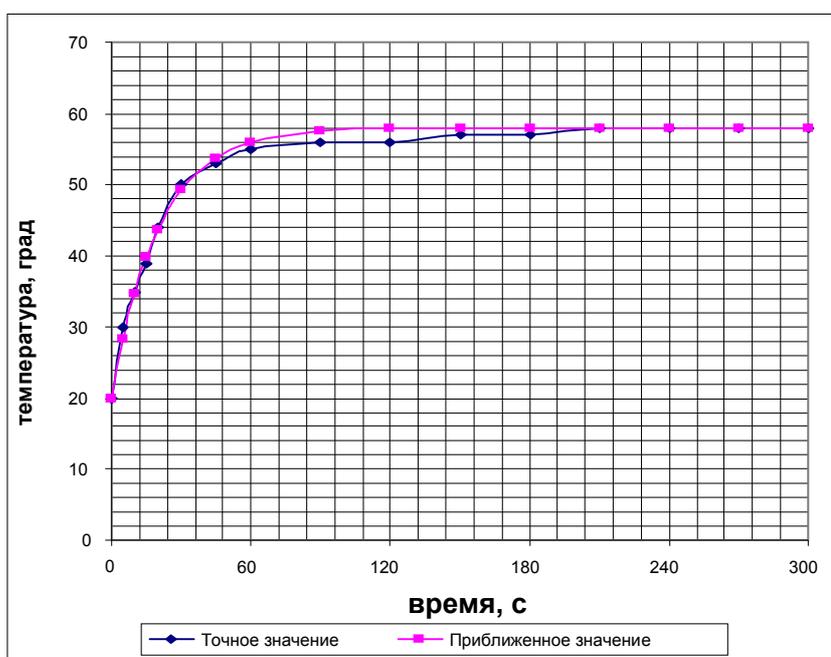


Рис. 4. Точное и приближенные значения температур для диаметра проводника $d = 2$ мм и частоты $f = 1,88$ кГц

Результаты аппроксимации приведены соответственно в табл. 2. Кроме того, в ней даны значения коэффициента γ , который показывает долю проникновения электромагнитного поля в проводник. Коэффициента γ рассчитываем, преобразовав уравнение [(6), 2], следующим образом:

$$\gamma = d \sqrt{\frac{f}{k}}, \quad (2)$$

где d – диаметр проводника, мм; f – частота электромагнитного поля индуктора, кГц; k – параметр, зависящий от свойств проводника, в данном случае равный 4,54.

Дополнительно в табл. 2 приведены значения критерия достоверности Ястремского J , который определяется по формуле [3]:

$$J = \frac{|C - N|}{\sqrt{2N + 4\theta}}, \quad (3)$$

где $C = \sum \frac{(f - f')^2}{f'}$, N – число групп или классов вариационного ряда; θ – величина, зависящая от числа групп N ; при $N \leq 20$ величина и не превосходит 0,6.

Так как число классов (в нашем случае количество исследуемых частот поля) не превышает 20, то величину 4θ можно считать равной 2,4; f и f' – соответственно эмпирические и вычисленные частоты ряда (в нашем случае, значения температуры полученные опытным путем и рассчитанные).

Таблица 2

Параметры уравнений нагрева проводника при диаметре $d = 2$ мм

Частота f , кГц	1,88	3,90	4,40	6,17	8,62	12,39	15,95	18,75
Коэффициент γ	1,29	1,85	1,97	2,33	2,76	3,30	3,75	4,06
Параметры уравнения:								
a	58	143	149	168	181	210	218	203
b	38	123	129	148	161	181	198	183
c	20,39	40,55	38,75	37,05	39,68	40,77	43,59	46,31
Критерий достоверности Ястремского J	2,67	2,71	2,69	2,65	2,68	2,66	2,68	2,65

Величина J имеет непрерывную функцию распределения и подчинена нормальному закону. Следовательно, с вероятностью $P = 99,5\%$ можно утверждать, что различия, наблюдаемые между эмпирическими f и вычисленными f' частотами носят случайный характер, если $J \leq 3$. Как показал расчет значения критерия Ястремского находятся в диапазоне от 2,65 до 2,71 и это меньше чем критическое значение этого показателя, равное 3. Таким образом, кривые нагрева проводника, помещенного в переменное электромагнитное поле, полученные расчетным способом полностью согласуются с полученными опытным путем, а различия между ними носят случайный характер с вероятностью $P = 99,5\%$.

Для определения оптимальной частоты электромагнитного поля индуктора, т.е. частоты при которой нагрев проводника помещенного в поле будет происходить при минимальных энергетических затратах, а значит за минимальный промежуток времени, возьмем первую производную от уравнения (1) в точке $t = 0$:

$$T' = \frac{b}{c} e^{-\frac{t}{c}} \quad (4)$$

Подставляя значения параметров нагрева из табл. 2 для момента времени $t = 0$, находим значения первой производной для различных кривых нагрева.

Результаты расчета первой производной, т.е. скорости нагрева, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения скорости нагрева в зависимости от параметра γ при диаметре $d = 2 \text{ мм}$

Параметр γ	1,29	1,85	1,97	2,33	2,76	3,30	3,75	4,06
Скорость нагрева $T'(t = 0)$	1,864	3,033	3,329	3,995	4,057	4,440	4,542	3,952

По данным табл. 3 строим график для диаметра 2 мм (рис. 5).

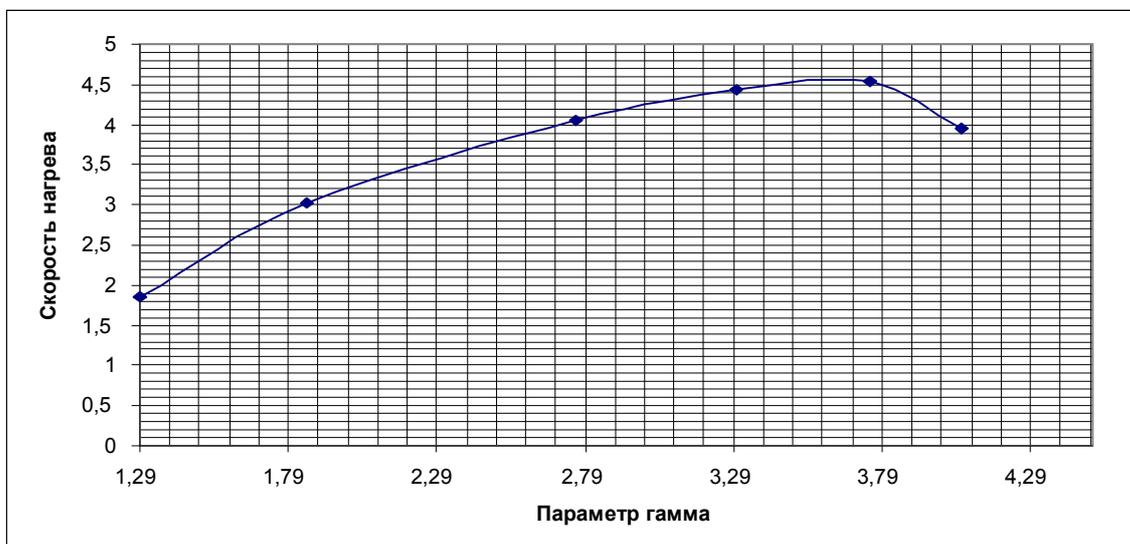


Рис. 5. График функции скорости нагрева проводника от параметра γ при диаметре $d = 2 \text{ мм}$

Максимум данной зависимости (рис. 5) равен при следующих значениях параметра γ для диаметра $d = 2 \text{ мм}$ – 3,75, что соответствует значению частоты 15,95 кГц электромагнитного поля индуктора, в которое помещен исследуемый проводник. Эти значения не плохо согласуются с данными, полученными расчетным путем (табл. 2 [2]), а именно, для диаметра $d = 2 \text{ мм}$ – 17,0 кГц. При этом отклонение равно 6,2 %.

Выводы. В процессе физического моделирования процесса удаления льда с проводов контактной сети наземного электротранспорта способом индукционного нагрева получены следующие результаты:

1. Разработана физическая модель процесса удаления льда индукционным способом;
2. Получены результаты нагрева проводника разного диаметра при изменении частоты электромагнитного поля.
3. Установлена зависимость скорости нагрева проводника от параметра глубины проникновения электромагнитного поля при различных диаметрах проводника.

Список литературы

1. Семендяев К.А. Эмпирические формулы. – М.-Л.: Гос. техн.-теоретич. изд-во, 1933. – 132 с.
2. В.Н. Лапицкий, А.Г. Рудченко. Минимизация энергетических затрат индуктора, применяемого для удаления льда с проводов контактной сети наземного электротранспорта // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2011» – Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2011. – С. 54-58
3. Рушинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента.– М.: Наука, 1971.–192 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Колесником В.Є.
Надійшла до редакції 30.04.2013*

УДК 004.932

© И.Н. Гаркуша

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ КОСМОСНИМКОВ В ЗАДАЧАХ ТЕПЛОВОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ГОРОДОВ

Рассмотрена технология применения скриптов автоматизации и инструментария ГИС GRASS при обработке разновременных мультиспектральных космоснимков Landsat-5 TM, включающих данные теплового канала. Представлены результаты обработки данных на примере города Березники (Российская Федерация), представлена одна из результирующих цифровых карт распределения температур.

Розглянута технологія використання скриптів автоматизації та інструментарію ГІС GRASS при обробці різночасових багатоспектральних космоснімків Landsat-5 TM, які містять дані теплового каналу. Представлені результати обробки даних на прикладі міста Березники (Російська Федерація) та представлена одна з результируючих цифрових карт розподілу температур.

The technology of application of automation scripts and tools GIS GRASS in processing of multispectral satellite images Landsat-5 TM, including data of thermal channel. Presents the results of processing data on the example of the city of Berezniki (Russian Federation), presents one of the resulting digital maps of the temperature distribution.

Введение. На кафедре геоинформационных систем в течение ряда лет проводятся работы по выявлению температурных аномалий территорий городов Украины, составлению карт распределения приповерхностной температуры