

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин В.М. Электронагревательные устройства трансформаторного типа. — Владивосток: Дальнаука, 2001. — 144 с.
2. Сериков А.В., Кузьмин В.М. Рекомендации для расчёта трансформатора с короткозамкнутой кольцевой вторичной обмоткой // Известия Томского политехнического университета. — 2011. — Т. 319. — № 4. — С. 79–84.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 160 с., ил.
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. — 288 с.: ил.
5. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Взамен ГОСТ 13109-87; Введ. 01.01.99 г. — М.: Изд-во стандартов, 1999. — 32 с.; Переиздание. Август 2006 г. — М.: Стандартинформ, 2006. — 32 с.

Поступила 20.01.2012 г.

УДК 621.3:536.7:678

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРООБОГРЕВАТЕЛИ АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

М.В. Халин, Е.И. Востриков

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

E-mail: temf@yandex.ru

Выполнен анализ существующих кабельных антиобледенительных систем, выявлены их достоинства и недостатки. Поставлены задачи исследований для широкого применения пластинчатых и объемных многоэлектродных композиционных электрообогревателей на основе бутилкаучука в антиобледенительных системах. Проведен комплекс электрофизических испытаний, который определил условия технологического регламента изготовления электрообогревателей с эффектами самостабилизации и саморегулирования. Доказана возможность длительной эксплуатации электрообогревателей во влажной и агрессивной среде и целесообразность их использования в антиобледенительных системах.

Ключевые слова:

Антиобледенительная система, многоэлектродный композиционный электрообогреватель, самостабилизация, саморегулирование, влажная и агрессивная среды.

Key words:

Anti-ice system, multi-electrode composite electric heater, self-stabilization, self-regulation, damp and aggressive environments.

Введение

Антиобледенительные системы зданий и сооружений, появившиеся сравнительно недавно, доказали свою эффективность и во всем мире используются в строительном производстве. Использование таких систем позволяет исключить образование наледи в водосточных трубах, желобах, воронках и других местах ее наиболее вероятного появления. Образование наледи приводит к уменьшению (вплоть до полного прекращения) оттока воды через водосточные желоба и трубы, что представляет серьезную опасность для жизни и здоровья людей и может привести к значительному материальному ущербу.

Основным элементом антиобледенительной системы являются нагревательные секции, назначение которых преобразовывать протекающий по ним ток в тепловую энергию. Поэтому мощность на единицу длины (удельное тепловыделение), а также площадь нагревательного элемента — их важнейшие электро-, теплофизические параметры.

Современные антиобледенительные системы базируются на четырех типах кабелей: резистивных, бронированных, зональных и саморегулируе-

мых, которые на российском рынке представлены следующими фирмами производителями «СПЕЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ» или ССТ (Россия), THERMO, KIMA Heating Cable (Швеция), CEILHIT (Испания), ENSTO, TASH (Финляндия), NEXANS Norway, AS ALCATEL (Норвегия/ Франция), DEVI (Дания) [1].

Анализ кабельных систем обогрева (табл. 1), выявил следующие недостатки:

- одинаковая теплоотдача кабеля по всей длине, что приводит к тому, что на одних участках кабель перегревается, а на других выделяемого им тепла может быть недостаточно для обеспечения удовлетворительного функционирования системы;
- малая площадь теплоотдачи кабеля, что требует использования значительной мощности для успешной работы системы;
- потеря работоспособности кабеля на всей длине секции при выходе из строя нагревательной жилы или повреждении изоляции.

Наиболее эффективными являются саморегулируемые кабели, которые в отличие от резистивных автоматически меняют мощность по длине секции в зависимости от фактических потерь те-

пла: при повышении температуры их тепловыделение падает, что создает эффект саморегулирования. Однако значительная стоимость саморегулируемых кабелей ограничивает их широкое применение.

Таблица 1. Технические характеристики кабельных систем обогрева

Тип кабеля	Объект подогрева	Диапазон мощностей, Вт/м	Длина секции	Применимость на кровлях
Резистивные	Полы	5...30	Фиксированная 10...200 м	Ограниченная
Бронированные	Открытые площадки, водостоки	20...45	Фиксированная с возможностью прирезки по месту 1...2 м	Подогрев длинных водостоков, капельников, бетонных лотков
Зональные	Трубопроводы	15...70	Любая, до 150 м резка по месту	Подогрев длинных водостоков
Саморегулируемые	Трубопроводы, лотки, водостоки	8...90	Любая, до 150 м резка по месту	Полная

Постановка задач

В связи с необходимостью совершенствования функционирования антиобледенительных систем определены следующие задачи исследований:

- разработка конструкций на основе энергоэффективного поверхностно-распределенного способа обогрева с использованием пластинчатых и объемных многоэлектродных композиционных электрообогревателей (МКЭ) и обоснование их технико-экономической целесообразности;
- выполнение комплексных экспериментальных исследований электро-, теплофизических характеристик композиционных электрообогревателей с целью определения необходимых параметров композиции и конструкции электрообогревателя;
- разработка устройств антиобледенительных систем водостоков кровли и подходов к зданиям на базе композиционных электрообогревателей с учетом предъявляемых к ним специальных требований: высокой прочности электрической изоляции; небольших токов утечки; достаточной теплоотдачи; стойкости к воздействию влаги, солнечной радиации; работе в широком диапазоне температур; низким энергопотреблением и т. д.

Результаты и их обсуждение

Предлагается система обогрева на базе многоэлектродных композиционных электрообогревателей [2, 3], рис. 1. Электроизоляционный слой — 3 представляет собой композицию на основе бу-

тилкаучука с выраженными электроизоляционными свойствами и улучшенными физико-механическими показателями, электропроводный слой — 4 изготовлен на основе бутилкаучука с техническим углеродом марок N-330, N-220. Электроды — 2 и токоподводы — 1 выполнены из медного гибкого провода сечением 1,5 мм².

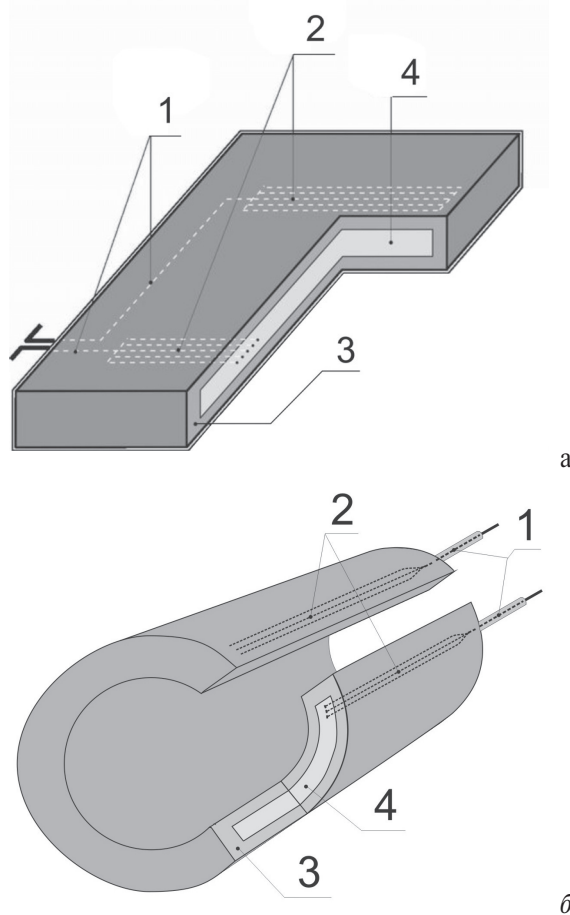
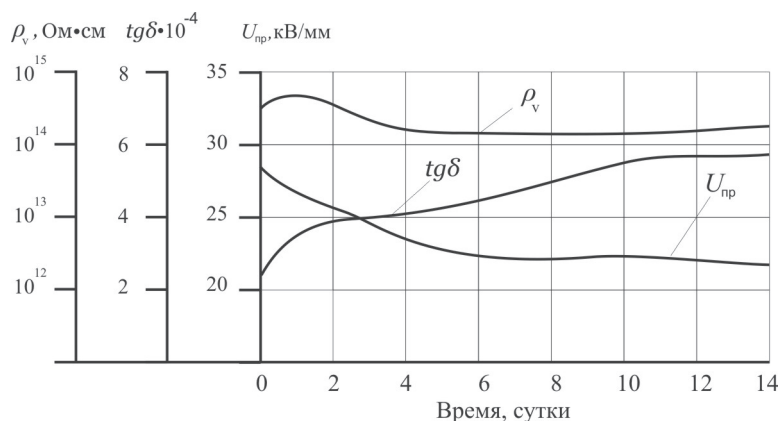


Рис. 1. Схематическое изображение МКЭ: а) пластинчатого; б) объемного

Проведенные исследования [4, 5] различных резиновых смесей доказали, что изделия из бутилкаучука обладают рядом отличительных свойств, достаточных и необходимых для создания электрообогревателей, работающих в антиобледенительных системах. Резины на основе бутилкаучука обладают высоким сопротивлением тепловому старению, устойчивы к действию азота, влаги, кислот и щелочей, а так же имеют высокие электроизоляционные свойства в широком диапазоне температур [6].

Для изоляционного слоя МКЭ получены зависимости удельного объемного сопротивления ρ_v , тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ и электрической прочности $U_{пр}$ от времени воздействия влаги (полное погружение изделия в воду) при нормальных температурных условиях (20 ± 5 °С), рис. 2. Исследования проведены по ГОСТ [7] с использованием измерителя ёмкости и $\tan \delta$ Е8-4 и установки высокого напряжения ПУС-4.

Рис. 2. Зависимость ρ_v , $\text{tg}\delta$ и $U_{\text{пр}}$ от времени воздействия влаги

Для определения показателей физико-механической прочности (ФМП), характеризующих старение резин в агрессивной среде, а, значит, и условий эксплуатации изоляционного слоя МКЭ, проведены исследования в ЦЗЛ ОАО «Барнаульская шинная компания» в соответствии с действующими методиками по ГОСТ [8, 9].

В табл. 2 приведены показатели ФМП, соответствующие производственным нормам по ГОСТ, и полученные усредненные значения для четырех образцов резиновых смесей, используемых для изоляционного слоя МКЭ (ПРИ-1-11).

Анализ данных табл. 2 позволяет сделать вывод о пригодности резиновой смеси ПРИ в качестве изоляционного слоя для производства электрообогревателей МКЭ.

Таблица 2. Показатели ФМП резиновых смесей

Тип смеси	Показатели ФМП			
	Условная прочность при растяжении f_p , МПа	Относительное удлинение ϵ_p , %	Пластичность P , у.е.	Относительное остаточное удлинение Θ , %
По ГОСТ [8, 9]	8,0 не менее	500 не менее	0,30 не менее	30 не более
ПРИ-1-11	12,9	530	0,39	16

Методика испытаний МКЭ на стойкость к агрессивным средам определяется по ГОСТ [10]. Сущность метода заключается в том, что образцы в ненапряженном состоянии подвергаются воздействию сред при заданной температуре и продолжительности и определяют их стойкость к указанному воздействию по изменению массы, объема или размеров.

В качестве агрессивной среды в исследованиях использованы: 5 % раствор аммиака; 10 и 20 % растворы серной кислоты; 10 и 20 % растворы гидроксида натрия; вода. Время набухания в агрессивной среде – 24 ч.

Показатели ФМП после воздействия агрессивной среды приведены в табл. 3, где ΔP – изменение пластичности образца.

Таблица 3. Показатели ФМП образцов резиновой смеси ПРИ-1-11 после воздействия агрессивной среды

Вид среды	f_p , МПа	ϵ_p , %	Θ , %	ΔP , %
NH_4OH , 5 %	11,1	530	21	3,85
H_2SO_4 , 10 %	11,5	570	22	1,30
H_2SO_4 , 20 %	11,5	550	19	2,60
NaOH , 10 %	10,4	550	20	2,52
NaOH , 20 %	8,4	560	23	7,41
H_2O	12,3	540	16	0,51

Анализ данных табл. 3 показывает, что резиновая смесь ПРИ-1-11 в нормальных условиях соответствующая требованиям, предъявляемым к данному типу резин, после воздействия агрессивной среды незначительно теряет прочность и имеет небольшой процент набухания.

С учетом специфики эксплуатации и функционирования антиобледенительных систем из всего многообразия разработанных конструкций МКЭ в качестве базовых выбраны два типа: пластинчатые, размером $200 \times 135 \times 10$ мм, и объемные цилиндрического типа, размерами: внутренний $\varnothing 24$ и внешний $\varnothing 44 \times 200$ мм [11]. Первый тип может эксплуатироваться на карнизах, яндовых, воронках и коробах, второй – в водосточных трубах.

Для энергоэффективного использования электрообогревателей МКЭ необходимо определить состав электропроводящей композиции, обеспечивающей эффекты саморегулирования и самостабилизации мощности в зависимости от окружающей температуры и условий эксплуатации.

Для исследования зависимости ρ_v электропроводного слоя от изменения температуры были выбраны две партии в каждой по пять МКЭ из высоконаполненных (41...52,5 м.ч. технического углерода (ТУ) и слабонаполненных (30...35 м.ч. ТУ) бутилкаучуков. Измерения проводились при температуре окружающей среды 18...20 °С, образец располагали на деревянном основании, на электрообогреватель подавалось напряжение 220 В частотой 50 Гц, через каждые пять минут в течение первого часа и через каждые десять в течение второго измерялись напряжение, ток МКЭ и температура

на его поверхности. Измерения проводились в течение 2 ч. Результаты исследований представлены на рис. 3.

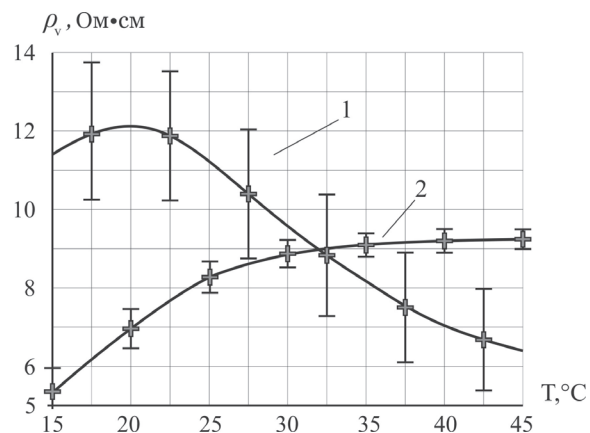


Рис. 3. Усредненные зависимости ρ , электропроводного слоя образцов МКЭ от температуры: 1) первой партии; 2) второй партии

Для приведенных зависимостей характерно, что в первое время идет увеличение удельного сопротивления, затем оно стабилизируется или незначительно меняется для первой партии образцов, что характеризуется положительным температурным коэффициентом. Установлено, что характер зависимости $\rho_v = f(T)$ аналогичен для образцов всей партии, среднее отклонение составило $\pm 7\%$ от измеряемой величины. Полученные характеристики подтверждают возможность работы МКЭ в режиме самостабилизации температуры на поверхности.

У второй партии образцов после достижения определенной температуры наблюдается снижение удельных сопротивлений (рис. 4), что характеризуется отрицательным температурным коэффициентом. Анализ приведенных зависимостей свидетельствует о преобладании связей полимер — проводящий наполнитель в резистивной фазе КМ, что характерно для полупроводниковых материалов и делает возможным работу МКЭ в режиме саморегулирования. В данном случае рецептура композиции в отличие от высоконаполненных полимеров содержит: 30...35 м.ч. ТУ, уменьшенное количество жирных органических кислот, например, стеариновой (до 2,5 м.ч.). Вследствие этого при технологии изготовления следует увеличить время смешения до 9 мин., температуру вулканизации снизить до 165°C при давлении 11 МПа, время вулканизации — 30 мин., температуру выгрузки смеси довести до 80°C . Таким образом, направленным изменением состава и соотношения ингредиентов композиции и регулированием технологического регламента изготовления можно получить МКЭ, обеспечивающие работу в режиме саморегулирования. При работе в этом режиме в отдельных случаях необходимо устанавливать терморегулирующие устройства.

По результатам электрофизических исследований установлены основные принципы реализации технологий поверхностно-распределенного элект-

трообогрева как со самостабилизацией температуры на поверхности композиционного электрообогревателя, так и с эффектом саморегулирования, включающие определение интервала температур, конструктивных параметров, рецептуры композиции проводящей фазы полимерного материала, технологических параметров изготовления.

Электрофизические характеристики исследовались на электрообогревателях — образцах: пластинчатых, размером $200 \times 135 \times 10$ мм, и объемных, размером $200 \times \varnothing 24 \times 10$ мм. Результаты теплофизических исследований для объемного МКЭ приведены на рис. 4.

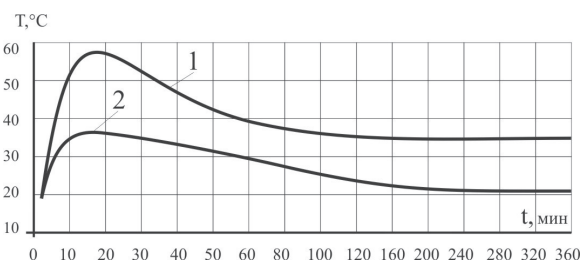


Рис. 4. Зависимость температуры на поверхности объемного МКЭ от времени при выходе на рабочий режим: 1) внутри; 2) снаружи

Разработанная антиобледенительная система, рис. 5, обеспечивает надежную работу и исключает вышеперечисленные недостатки кабельных систем [2, 11].

На ремне — 1 с помощью заклепочного соединения — 2 закреплены электрообогреватели — 3, расположенные с интервалом друг от друга (рис. 5, а). Вдоль ремня — 1 проложены электрические провода — 4, к которым параллельно подключены электрообогреватели — 3 посредством токоподводов — 5. Для обеспечения электробезопасности используется заземляющий кабель — 6, который крепится с помощью заклепок между ремнем — 1 и электрообогревателями — 3. Собранный ремень с электрообогревателями крепится на входе пристенного водостока — 7 с помощью штанги — 8 и кронштейнов — 9.

На рис. 5, б, представлена схема подключения объемных электрообогревателей — 3, расположенных в пристенном водостоке — 10, соединенном с карнизом — 11. На тросе — 12 с помощью металлического зажима — 13 закреплены электрообогреватели — 3, расположенные с интервалом друг от друга. Вдоль заземленного стального троса — 12 проложены и соединены посредством хомутов — 14 электрические провода — 4, к которым параллельно подключены электрообогреватели — 3 через токоподводы — 5. Собранный трос с электрообогревателями крепится на входе водостока — 10 к стене с помощью болтового соединения — 15.

Опытная эксплуатация электрообогревателей МКЭ на двух объектах г. Барнаула в течение трех лет показала надежность и эффективность разработанной конструкции и позволила уменьшить затраты на электроэнергию по сравнению с кабельными системами обогрева в два раза [11].

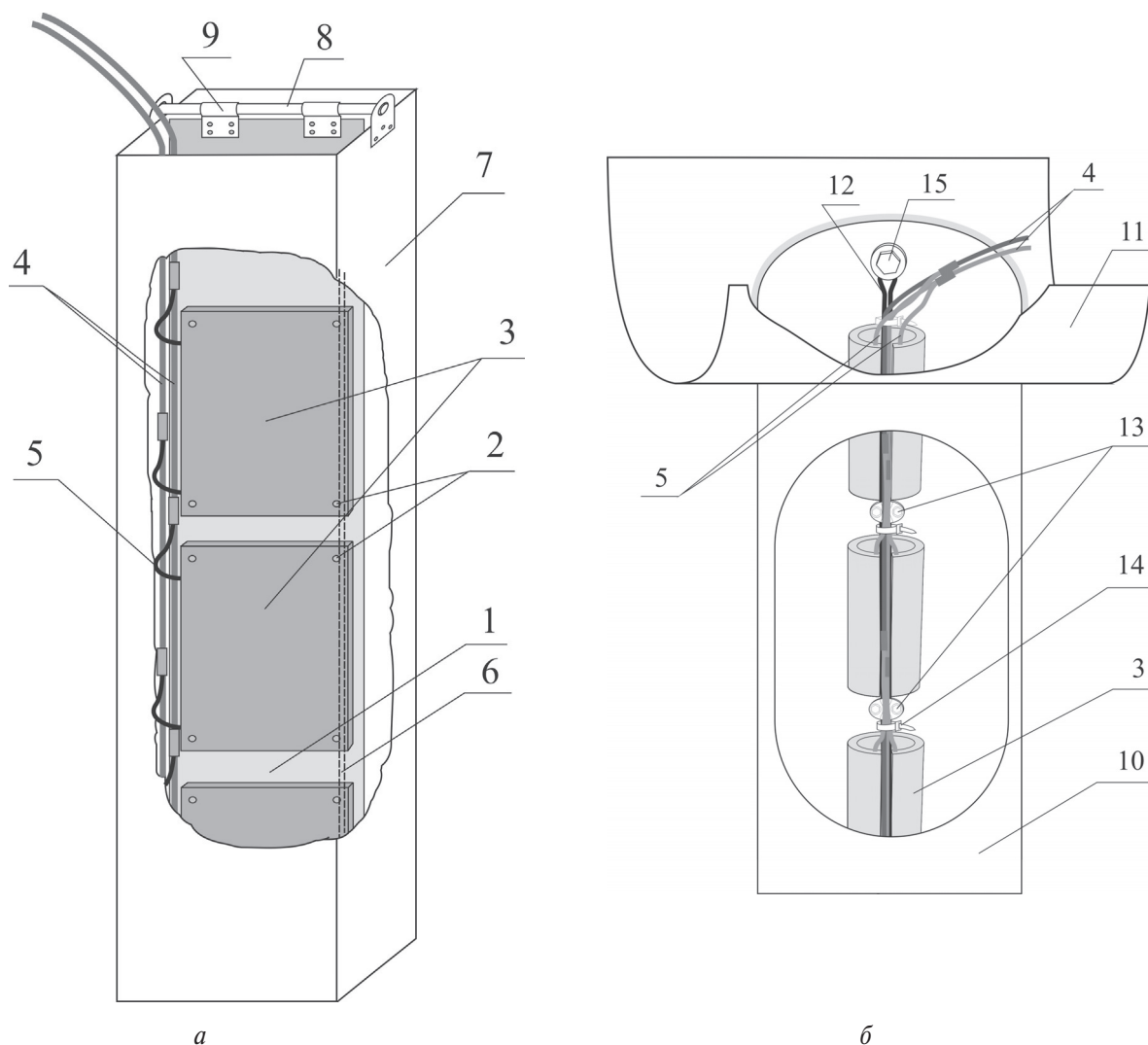


Рис. 5. Расположение МКЭ: а) пластинчатых на монтажном ремне; б) объемных на стальном тропе

Выводы

1. Разработана антиобледенительная система на основе поверхностно-распределенных пластинчатых и объемных многоэлектродных композиционных электрообогревателей, преимущества которой состоят в следующем:
 - выход из строя нескольких электрообогревателей существенно не влияет на работу всей нагревательной секции, если неработающие нагреватели не сосредоточены на небольшом участке длины;
 - значительная площадь поверхности обогрева;
 - регулирование распределения мощности по длине секции: в местах наибольшего скопления льда (например, на входах и выходах водостоков) устанавливаются электрообогреватели большей мощности.

2. Многоэлектродные композиционные электрообогреватели обеспечивают:

- равномерность распределения и необходимые параметры температурного поля на поверхности электрообогревателя;
- условия электро-, пожаробезопасности, надежности, влаго- и химической стойкости в агрессивной среде, экологической чистоты;
- теплостойкость, высокие диэлектрические показатели, теплоаккумулирующие свойства, значительную наработку на отказ;
- надежность системы управления мощностью электрообогрева и выполнение условий саморегулирования и самостабилизации температуры;
- энергоэффективность и экономическую целесообразность применяемых технических средств электрообогрева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антиобледенительные системы // Строительный сезон. – 2001. – № 5. – С. 28–33.
2. Способ удаления льда с водостоков крыш зданий и сооружений: пат. 2209906 Рос. Федерация. № 2002118385/03; заявл. 08.07.02; опубл. 10.08.03, Бюл. № 22. – 5 с.
3. ТУ 3468-007-02067824-2003. Многоэлектродные композиционные электрообогреватели (МКЭ). № Гос. рег. 004026 / Разработчик М.В. Халин. – Барнаул, 2003. – 24 с.
4. Евстигнеев В.В., Пугачев Г.А., Халина Т.М., Халин М.В. Расчет и проектирование низкотемпературных композиционных электрообогревателей. – Новосибирск: Наука, 2001. – 168 с.
5. Халин М.В. Теория и разработка низкотемпературных электрообогревателей: дис.... д-ра техн. наук. – Барнаул, 1998. – 330 с.
6. Справочник резинщика / ред. кол. П.И. Захарченко, Ф.И. Яшунская, В.Ф. Евстратов, П.Н. Орловский. – М.: Химия, 1971. – 608 с.
7. ГОСТ 20214-74. Пластмассы электропроводящие. Метод определения удельного объемного электрического сопротивления при постоянном напряжении.
8. ГОСТ 270-75. Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении.
9. ГОСТ 415-75. Каучуки и резиновые смеси. Метод определения пластозластичных свойств на пластомере.
10. ГОСТ 9.030-74. Резина. Методы испытания на стойкость в ненапряженном состоянии к воздействию жидких агрессивных сред.
11. Халин М.В., Востриков Е.И., Бутцев Д.В. Энергоэффективная антиобледенительная система на основе композиционных электрообогревателей // Энергообеспечение и энергосбережение – региональный аспект: Матер. докл. XII Всеросс. совещ. – Томск: Изд-во «СПБ Графикс», 2011. – С. 32–35.

Поступила 26.12.2011 г.

УДК 621.374.4/5:517

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КРИТЕРИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА С ПЕРИОДИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ПАРАМЕТРОМ

Р.А. Вайнштейн, Н.В. Коломиец, В.В. Шестакова

Томский политехнический университет
E-mail: vra@tpu.ru

Показано, что выполнение условия равенства среднего за период значения собственной частоты параметрических колебаний позволяет получить соотношения между электромагнитными и конструктивными параметрами делителя частоты на границе возникновения колебаний половинной частоты и в стационарном режиме. Полученные соотношения позволяют произвести расчеты с достаточной точностью.

Ключевые слова:

Делитель частоты, параметрические колебания, средняя частота.

Key words:

Frequency demultiplier, parametric variation, medium frequency.

Данная работа выполнена в связи с использованием электромагнитного параметрического делителя частоты на два в качестве основного элемента источника контрольного тока, используемого для выполнения защиты от замыканий на землю в электроустановках напряжением 6–35 кВ [1].

Электромагнитный параметрический делитель частоты является известным устройством. Впервые параметрические колебания в электрических системах были реализованы и теоретически описаны Л.И. Мандельштамом и Н.Д. Папалекси [2]. Также они предложили использовать для реализации параметрических колебаний в электрических цепях индуктивность с нелинейным ферромагнитным сердечником.

Электромагнитный параметрический делитель частоты содержит два замкнутых магнитопровода из электротехнической стали А и Б, на каждом из которых нанесены по две обмотки с числом витков w_1 и w_2 , рис. 1.

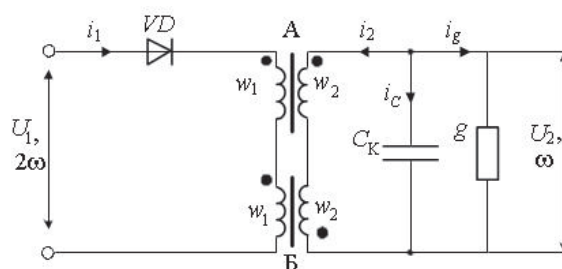


Рис. 1. Схема делителя частоты с вентилем в цепи питания

Обмотки w_1 вместе с вентилем VD образуют цепь, называемую цепью возбуждения, которая подключается к источнику переменного тока с частотой 2ω . Обмотки w_2 образуют вместе с конденсатором C_k параметрически возбуждаемый колебательный контур. Обмотки сердечников А и В соединены так, что между ними нет электромагнитной связи, и поэтому вынужденные колебания с частотой 2ω в колебательном контуре отсутствуют. Роль