

## ЭЛЕМЕНТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ГИБКИЕ ЛЕНТОЧНЫЕ В РЕЖИМЕ С ПИТАНИЕМ ТОКОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В работе представлены результаты исследований энергетических и технологических параметров элементов нагревательных гибких ленточных при различных электрических режимах: при питании переменным током частотой 50 Гц; постоянным (выпрямленным) током; током сложной формы с постоянной составляющей и без нее. Цель работы — исследование влияния электрических режимов на энергетические и технологические параметры нагревателей для разработки рекомендаций по выбору эффективных режимов работы подобных нагревателей при питании током сложной формы для разработки автоматизированных систем управления, предполагающих использование двух каналов регулирования: по амплитуде напряжения (тока) и по спектру частот.

**Ключевые слова:** элемент нагревательный гибкий ленточный, род тока (переменный, постоянный, сложной формы), потери активной мощности.

Потери мощности в электротехнических устройствах зависят от различных факторов. В [1] установлено, что в электрических промышленных сетях увеличение потерь мощности и энергии обусловлено высшими гармониками тока, при возрастании доли нелинейной нагрузки. Согласно [2], при расчете нагрева проводников от протекания тока (Джоулев нагрев) следует учитывать дополнительное увеличение потерь в электрических сетях, связанное с температурным фактором. Для воздушных линий электропередач диапазон изменения температуры окружающей среды достигает  $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для неизолированных проводов со стальным сердечником в нем при переменном токе возникает дополнительный нагрев вихревыми токами (магнитный нагрев) [2]. Еще более тяжелые условия эксплуатации электротехнических устройств имеют место в технологических установках. Например, при получении сжиженных газов на установках разделения воздуха. Процесс разделения воздуха осуществляется в криогенных системах, работающих при температуре  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Управление технологическими операциями криогенных установок осуществляется с помощью запорной, регулирующей и дренажно-предохранительной криогенной аппаратуры. Для обогрева

регулирующей аппаратуры таких воздухоотделительных установок применяются специализированные автоматические системы электрообогрева. Опыт эксплуатации систем электрообогрева показал, что наиболее надежным электротехническим устройством является электрический нагреватель (полужесткий нагреватель), работающий в условиях значительных колебаний температур и повышенной влажности [3].

На отдельном предприятии могут использоваться различные электронагреватели. Так, на нефтеперерабатывающих заводах находят применение погружные нагреватели, фланцевые погружные нагреватели, проточные электронагреватели, каналные нагреватели воздуха. Современные электронагреватели выпускаются мощностью до 5 МВт, на температуры нагрева до  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , нагреватели, работающие при давлениях до 25 МПа. Современные системы обогрева могут использовать резистивный кабель, скин-систему или саморегулирующийся кабель с различными изоляциями: InWarm Wool, InWarm Foam, InWarm Flex [3]. Применение скин-систем — стержневых индукторов и индукторно-резистивных систем нагрева (ИРСН) потребовало разработки методики расчета мощности потерь на перемагничивание стали

при частоте 50 Гц, то есть потерь на гистерезис. Напомним, что сортамент труб для нефтепроводов — это буровые, обсадные, насосно-компрессорные. Они выполнены из среднеуглеродистой или низколегированной стали, то есть из ферромагнитной стали, покрыты снаружи битумной мастикой [3–6]. Протяженность систем обогрева на нефтепроводе достигает 15 км, напряжение питания — 5 кВ (это значение ограничено возникновением частичных разрядов внутри изолирующих элементов) [5, 6]. Проблема — увеличения длины систем обогрева. Длина может быть увеличена в два раза в ИРСН применением внутреннего шунтирования: шунтов разной конфигурации (биметаллического внешнего проводника, пластины, кабеля), проложенных внутри ферромагнитной трубы. Эквивалентность способов организации внутреннего шунтирования была подтверждена экспериментально [6].

В нефтегазовой отрасли при большой протяженности магистральных нефтепроводов при их обогреве показателем эффективности работы электрических нагревателей как электротехнических устройств являются удельные поверхностные мощности. Их значение не должно превышать 5 кВт/м<sup>2</sup> [4].

Таким образом, не только высшие гармоники, температура, влажность, а также потери на гистерезис и вихревые токи, уровень питающего напряжения и род тока влияют на эффективность работы электрических сетей и отдельных электротехнических устройств. Известно [1–6], потери активной мощности при переменном токе частотой 50 Гц возрастают, по сравнению с потерями на постоянном токе за счет поверхностного эффекта и эффекта близости [5, 6]. Однако в литературе не нашло отражение влияния тока сложной формы на эффективность работы таких электротехнических устройств как устройств электрообогрева.

В электротехнологии, напротив, ток пониженной или повышенной частоты, импульсный ток, ток сложной формы (ТСФ) с постоянной составляющей и без нее (спектр гармоник) используют для получения позитивных электрических и технологических эффектов при высоких температурах расплавов электролитов 950–960 °С и для дуговых разрядов в плавильных печах прямого и косвенного нагрева малой емкости, в печах обжига зеленых заготовок и графитизации [7, 8]. Экспериментально доказано [7, 8], в электрических печах сопротивления прямого и косвенного нагрева повышение эффективности также возможно за счет совершенствования электрического режима: при использовании ТСФ. Исследованы темные инфракрасные (ИК) — излучатели керамические «НОМАКОН» типа ИКН-203-0,1/230-2 мощностью 100 Вт с плоской излучающей поверхностью 60×60 мм, а также светлые излучатели — температурные излучатели мощностью 100 Вт. Отмечено увеличение выхода фотонов с поверхности диффузора в режиме с питанием ТСФ для температурного излучателя за счет электромагнитной составляющей, действующей в излучателе наряду с температурной составляющей. Отмечено возрастание коэффициента мощности для исследуемых электротехнических устройств [7, 8].

**Целью работы** является исследование электрических режимов элемента нагревательного гибкого ленточного в установившемся режиме, для разработки рекомендаций по выбору эффективных режимов работы электротехнических устройств с питанием ТСФ и разработки алгоритмических основ системы автоматического управления.

Опыты выполнены в сравнении четырех электрических режимов: обычного с питанием переменным током частотой 50 Гц, нового с питанием постоянным током (выпрямленным), нового с питанием током сложной формы с постоянной составляющей, нового с питанием током сложной формы без постоянной составляющей. В обычном режиме питание нагревателя ЭНГЛ-2 реализовано от однофазного трансформатора типа ОСМ-2,5 УХЛ 3 с напряжением на высокой стороне 220 В и на низкой стороне 110 В переменным током частотой 50 Гц. Трансформатор имеет на первичной стороне контактные зажимы А-Х<sub>1</sub>, А-Х<sub>2</sub>, А-Х<sub>3</sub>. В экспериментах напряжение подерживали при разных положениях ступеней ПБВ. В новом режиме с питанием постоянным током дополнительно подключали однофазный мостовой выпрямитель на диодах, в режиме ТСФ с постоянной составляющей дополнительно включали нелинейную индуктивность (дроссель) и однофазный мостовой выпрямитель, в новом режиме с питанием ТСФ без постоянной составляющей использован дроссель для изменения формы тока (напряжения).

В работе в качестве объекта исследования использовано электротехническое устройство — элемент нагревательный гибкий ленточный типа ЭНГЛ-2. Основные параметры и размеры: ЭНГЛ-2 — 0,05/220-2,6 (напряжение 220 В, номинальная мощность 0,05 кВт, длина нагревателя 2,6 м, ширина 23 мм, толщина 3,3 мм, предельная температура на поверхности — 60 °С, удельное тепловыделение 40 Вт/м, степень защиты IP47, климатическое исполнение УХЛ1, материал изоляции пищевой полиэтилен).

Назначение: используются для защиты от замерзания, разогрева и компенсации теплотерь трубопроводов теплообменников, емкостей и др. технологического оборудования. Разрешается эксплуатация нагревателей в пожароопасных установках (наружных и помещениях) классов П-I, П-II, П-III [9].

**Приборы.** Для исследования электрических параметров силовой и осветительной нагрузки использовали анализатор качества электрической энергии типа ANALYST 2060. Для измерения температуры в электротехническом устройстве типа ЭНГЛ-2 применяли тепловизор типа Testo 885-2, серийный номер № 2358782, объектив стандартный 30°, тип детектора — 3200×240 пикс., температурная чувствительность < 30 Мк, спектральный диапазон — 8–14 мкм, температурный диапазон — –20 °С до +100 °С (0 °С до +350 °С), измерение высоких температур — от +350 °С до +550 °С, погрешность — ±2 °С (±2 %), таймер, амперметр и вольтметр. При выполнении экспериментальных исследований измеряли тепловое поле элемента нагревательного гибкого ленточного для указанных выше электрических режимов. По результатам

исследований получены файлы радиометрических термограмм, обработанные с использованием специального программного обеспечения, входящего в комплект портативного тепловизора Testo 885-2. При этом тепловизор визуализировал ИК-излучение (мощность излучения) от каждой точки ИК-излучателя и бесконтактно измерял температуру его поверхности, то есть пересчитывал мощность излучения в температуру поверхности излучателя.

В табл. 1 даны параметры, характеризующие работу электротехнического устройства — элемента нагревательного гибкого ленточного ЭНГЛ-2 мощностью 50 Вт в указанных четырех электрических режимах.

В табл. 2 даны начальная и конечная температура нагрева ЭНГЛ-2, характеризующие скорость подъема температуры за время каждого опыта, а также общий коэффициент гармонических искажений THD в питающей сети для четырех электрических режимов.

На рис. 1–4 даны окна термограмм, отражающие характер изменения температуры элемента нагревательного в обычном электрическом режиме при частоте 50 Гц для различного времени подъема температуры: через 1 минуту, через 5 минут, 7 и 10 минут.

На рис. 5 дано окно термограммы для указанного нагревателя в режиме питания постоянным током (выпрямленным).

Таблица 1

Показатели работы элемента нагревательного гибкого ленточного мощностью 120 Вт при различных электрических режимах

Наименование электрического режима	Мощность из сети			Коэффициент мощности	Общий коэффициент гармонических искажений, THD, %
	активная, $P$ , кВт	реактивная, $Q$ , квар	полная, $S$ , кВА		
1. <b>Обычный режим:</b> переменный ток, 50 Гц	0,025	0,098	0,102	0,245	2,5
2. <b>Новый режим:</b> выпрямленный	0,027	0,102	0,106	0,255	2,8
3. <b>Новый режим:</b> ТСФ с постоянной составляющей	0,017	0,016	0,024	0,710	2,6
4. <b>Новый режим:</b> ТСФ без постоянной составляющей	0,017	0,016	0,024	0,710	2,7

Таблица 2

Изменение температуры элемента нагревательного гибкого ленточного мощностью 120 Вт при различных электрических режимах

Наименование электрического режима	Температура, °С		Излучение	Время эксперимента, мин
	начальная	конечная		
1. <b>Обычный режим:</b> переменный ток, 50 Гц	25,0	34,6	0,95	10
2. <b>Новый режим:</b> выпрямленный	25,0	36,2	0,95	10
3. <b>Новый режим:</b> ТСФ с постоянной составляющей	25,0	35,0	0,95	10
4. <b>Новый режим:</b> ТСФ без постоянной составляющей	25,0	34,6	0,95	10

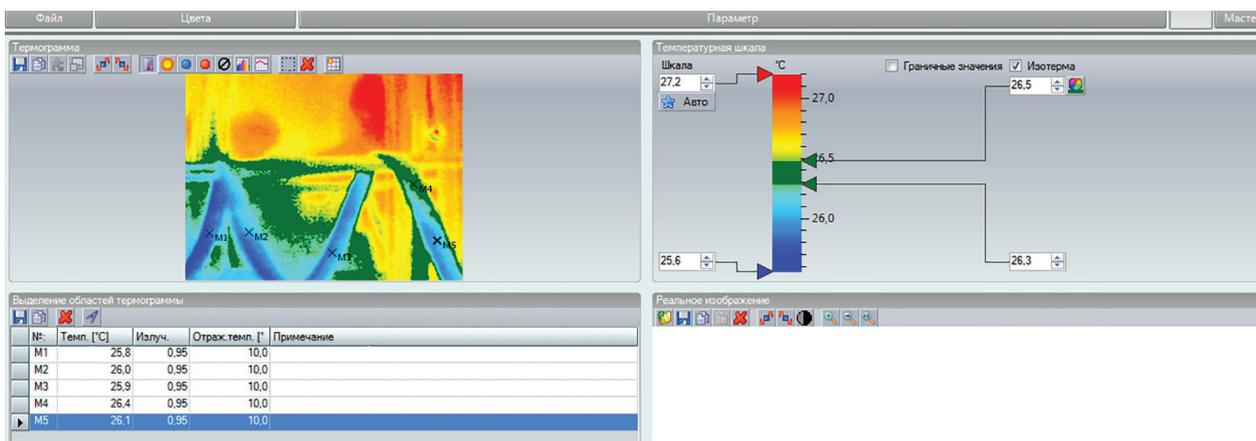


Рис. 1. Окно термограммы нагрузки физической модели установки с элементом нагревательным гибким ленточным в обычном режиме через 1 минуту нагрева: переменный ток частота 50 Гц (температура в точках M1 — 32,1 °C; M2 — 31,7 °C; M3 — 28,5 °C; M4 — 32,1 °C; M5 — 32,5 °C)

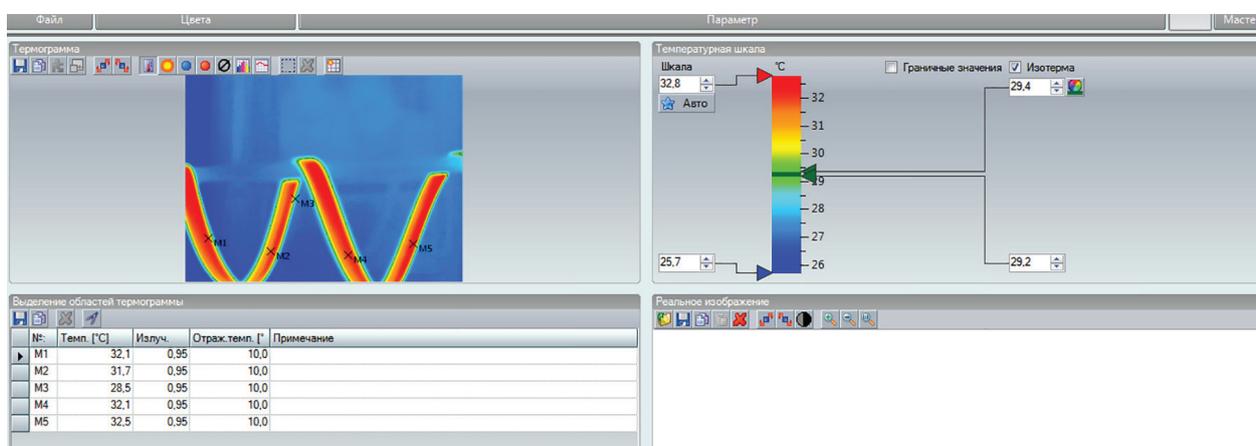


Рис. 2. Окно термограммы нагрузки физической модели установки с элементом нагревательным гибким ленточным в обычном режиме через 5 минут нагрева: переменный ток частота 50 Гц (температура в точках M1 — 32,1 °C; M2 — 31,7 °C; M3 — 28,5 °C; M4 — 32,1 °C; M5 — 32,5 °C)

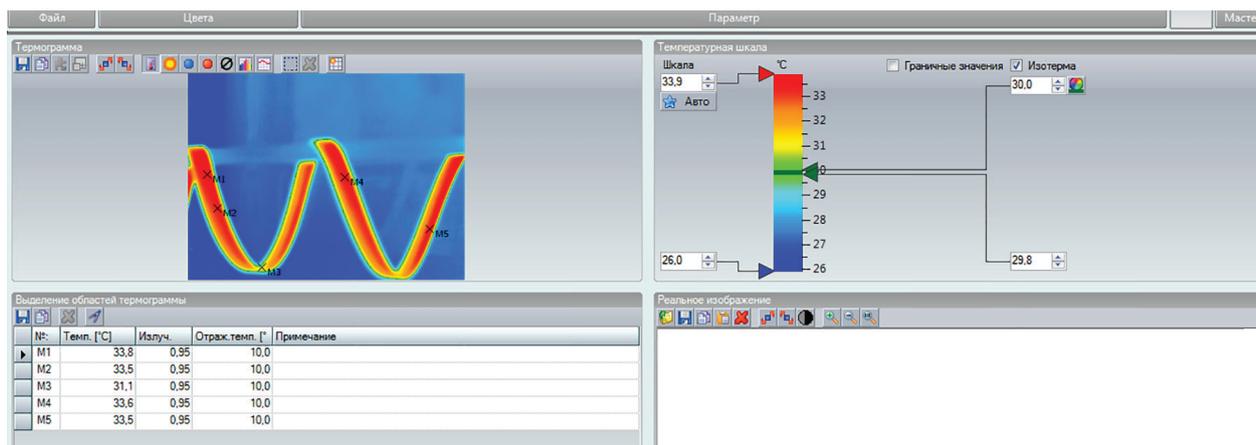


Рис. 3. Окно термограммы нагрузки физической модели установки с элементом нагревательным гибким ленточным в обычном режиме через 7 минут нагрева: переменный ток частота 50 Гц (температура в точках M1 — 33,8 °C; M2 — 33,5 °C; M3 — 31,1 °C; M4 — 33,6 °C; M5 — 33,5 °C)

Временная реализация опыта составила 10 минут.

На рис. 6–9 даны окна термограмм, отражающие характер изменения температуры элемента нагревательного в режиме при питании током

сложной формы с постоянной составляющей для различного времени подъема температуры: через 1 минуту, через 5 минут, 7 и 10 минут.

На рис. 10–13 даны окна термограмм, отражающие характер изменения температуры

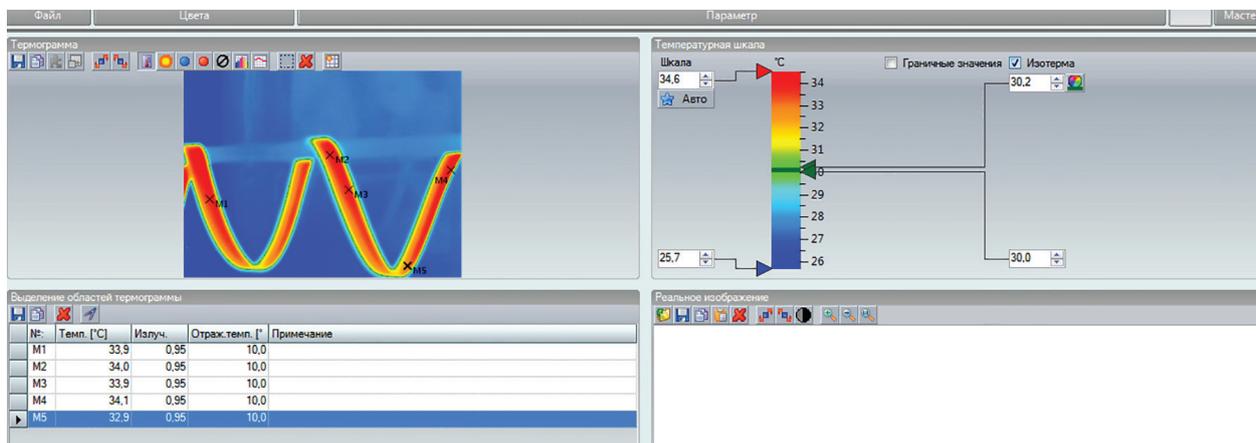


Рис. 4. Окно термограммы нагрузки физической модели установки с элементом нагревательным гибким ленточным в обычном режиме через 10 минут нагрева: переменный ток частота 50 Гц (температура в точках M1 — 33,9 °C; M2 — 34,0 °C; M3 — 33,9 °C; M4 — 34,1 °C; M5 — 32,9 °C)

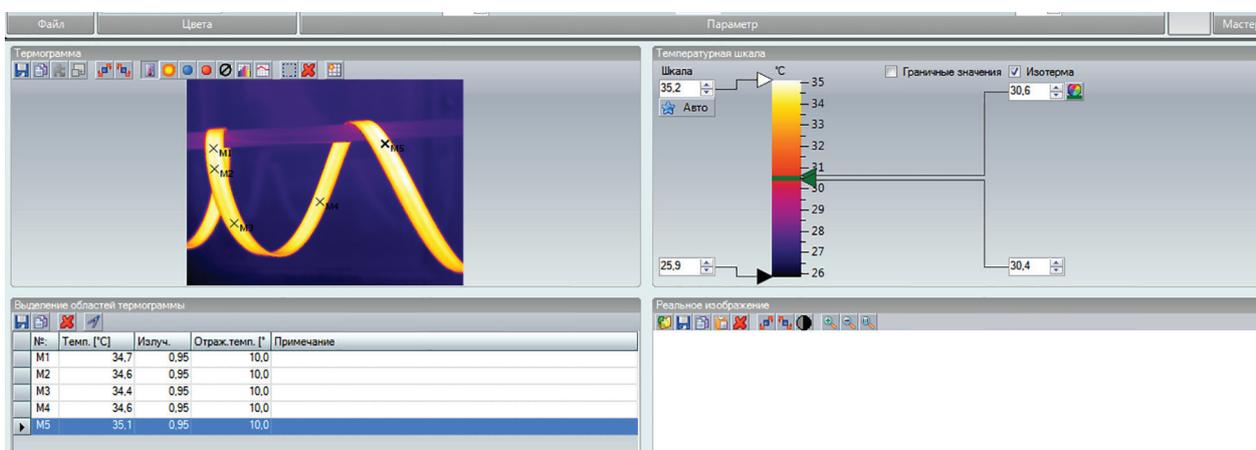


Рис. 5. Окно термограммы нагрузки физической модели установки с элементом нагревательным гибким ленточным в новом режиме с питанием постоянным током (выпрямленным) за 10 минут нагрева (температура в точках M1 — 34,7 °C; M2 — 34,6 °C; M3 — 34,4 °C; M4 — 34,6 °C; M5 — 35,1 °C)

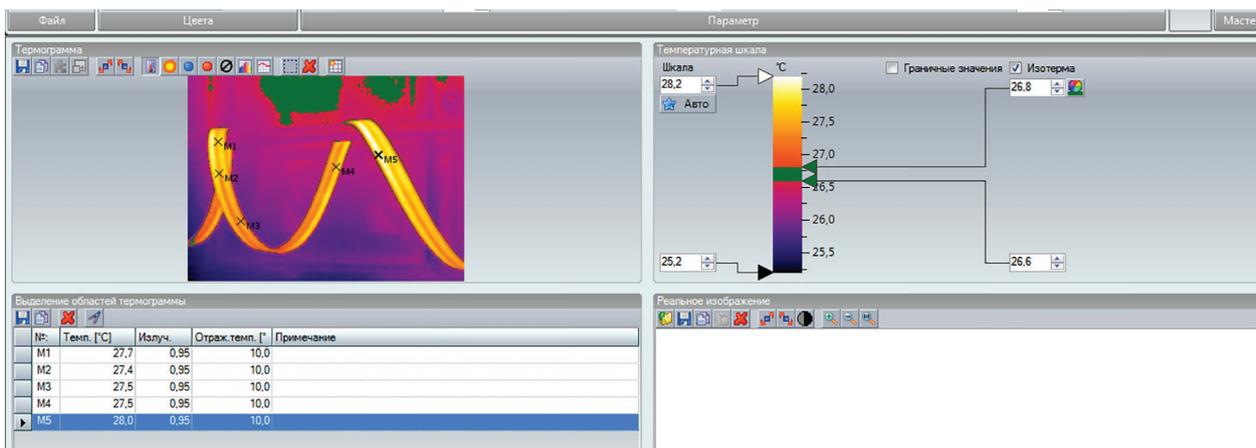


Рис. 6. Окно термограммы нагрузки физической модели установки с элементом нагревательным гибким ленточным в новом режиме с питанием ТСФ с постоянной составляющей через 1 минуту нагрева (температура в точках M1 — 27,7 °C; M2 — 27,4 °C; M3 — 27,5 °C; M4 — 27,5 °C; M5 — 28,0 °C)

элемента нагревательного в режиме при питании током сложной формы без постоянной составляющей для различного времени подъема температуры: через 1 минуту, через 5 минут, 7 и 10 минут.

Экспериментально подтверждено, что в новом режиме с питанием ТСФ работа электротехнического устройства реализована на более низкой ступени ПБВ силового трансформатора А-Х<sub>1</sub>–А-Х<sub>3</sub>. При переходе на более низкую ступень

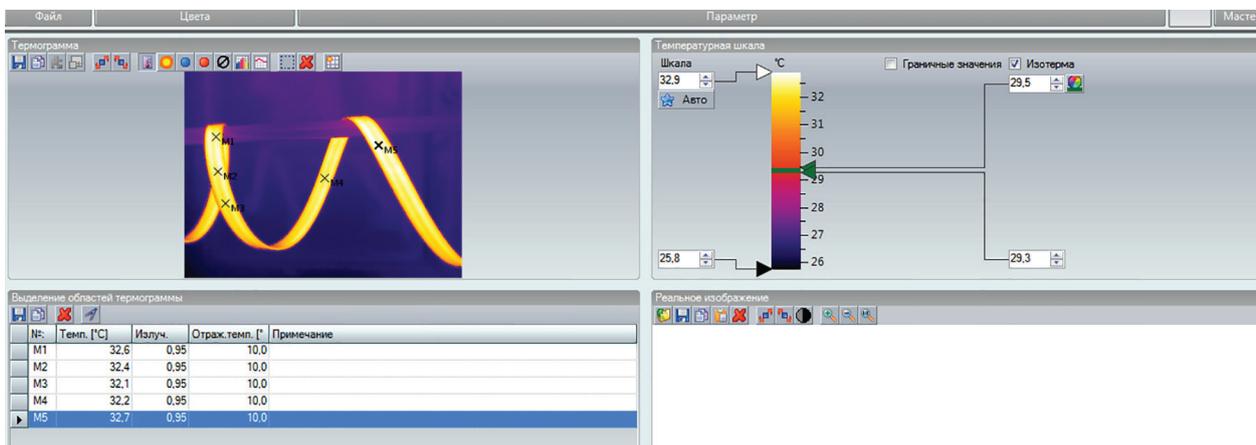


Рис. 7. Окно термограммы нагрузки физической модели установки с элементом нагревательным гибким ленточным в новом режиме с питанием ТСФ с постоянной составляющей через 5 минут нагрева (температура в точках M1 — 32,6 °C; M2 — 32,4 °C; M3 — 32,1 °C; M4 — 32,2 °C; M5 — 32,7 °C)

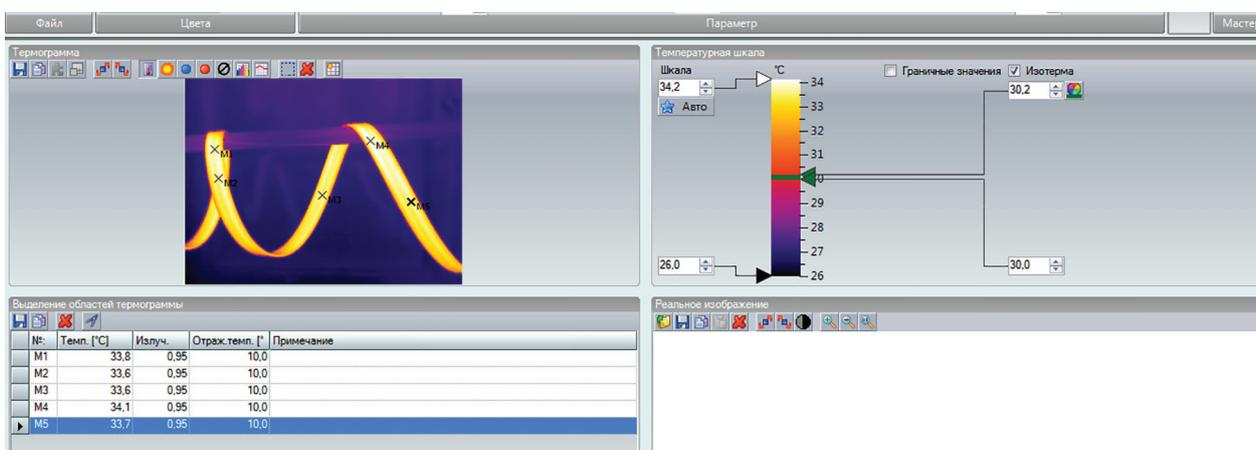


Рис. 8. Окно термограммы нагрузки физической модели установки с элементом нагревательным гибким ленточным в новом режиме с питанием ТСФ с постоянной составляющей через 7 минут нагрева (температура в точках M1 — 33,8 °C; M2 — 33,6 °C; M3 — 36,6 °C; M4 — 34,1 °C; M5 — 33,7 °C)

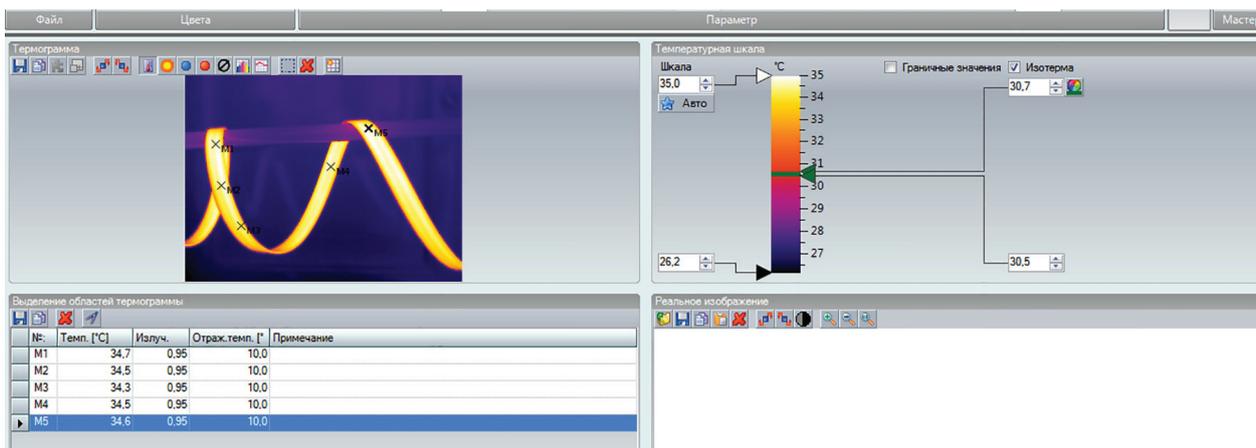


Рис. 9. Окно термограммы нагрузки физической модели установки с элементом нагревательным гибким ленточным в новом режиме с питанием ТСФ с постоянной составляющей через 10 минут нагрева (температура в точках M1 — 34,7 °C; M2 — 34,5 °C; M3 — 34,3 °C; M4 — 34,5 °C; M5 — 34,6 °C)

пень снижается потребление из сети реактивной мощности. Экспериментально установлено, что в четырех исследуемых режимах имела место одинаковая скорость подъема температуры в элементе нагревательным гибким ленточным.

За 10 минут в каждом из указанных четырех режимов температура изменилась в соответствующих диапазонах: 25,0–34,6; 25,0–36,2; 25,0–35,0; 25,0–34,6 °C. В новых режимах с питанием ТСФ отмечено улучшение энергетических показате-

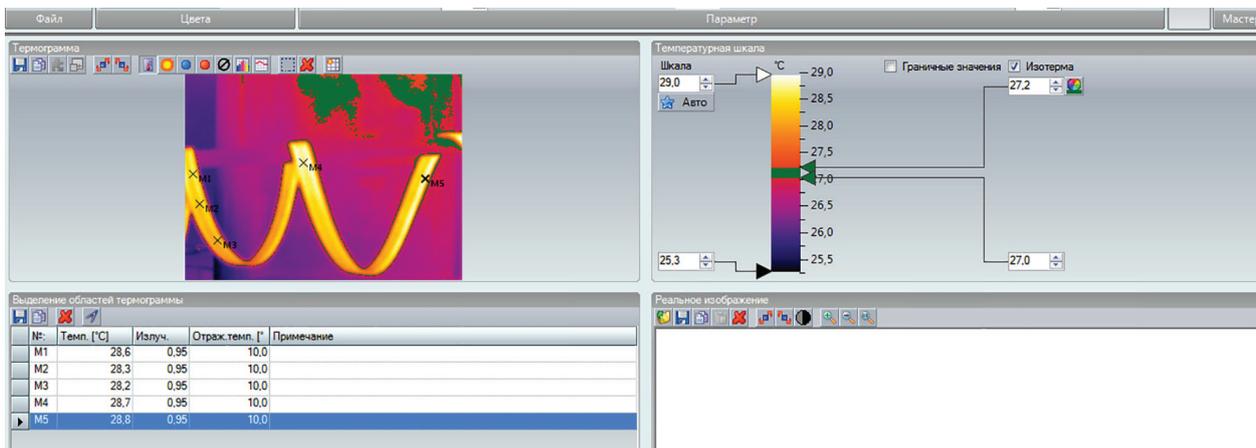


Рис. 10. Окно термограммы нагрузки физической модели установки с элементом нагревательным гибким ленточным в новом режиме с питанием ТСФ без постоянной составляющей за 1 минуту нагрева (температура в точках M1 — 28,6 °C; M2 — 28,3 °C; M3 — 28,2 °C; M4 — 28,7 °C; M5 — 28,8 °C)

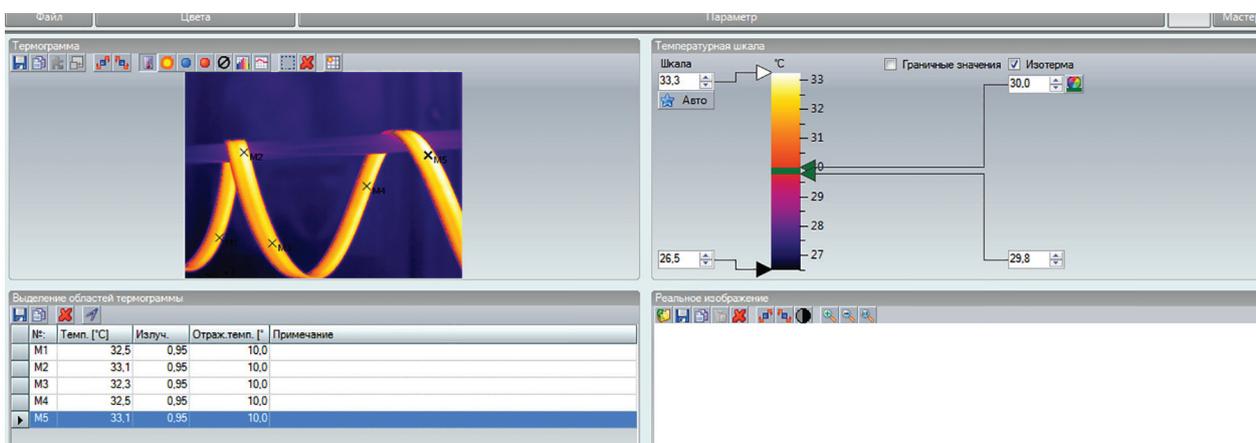


Рис. 11. Окно термограммы нагрузки физической модели установки с элементом нагревательным гибким ленточным в новом режиме с питанием ТСФ без постоянной составляющей за 5 минут нагрева (температура в точках M1 — 32,5 °C; M2 — 33,1 °C; M3 — 32,3 °C; M4 — 32,5 °C; M5 — 33,1 °C)

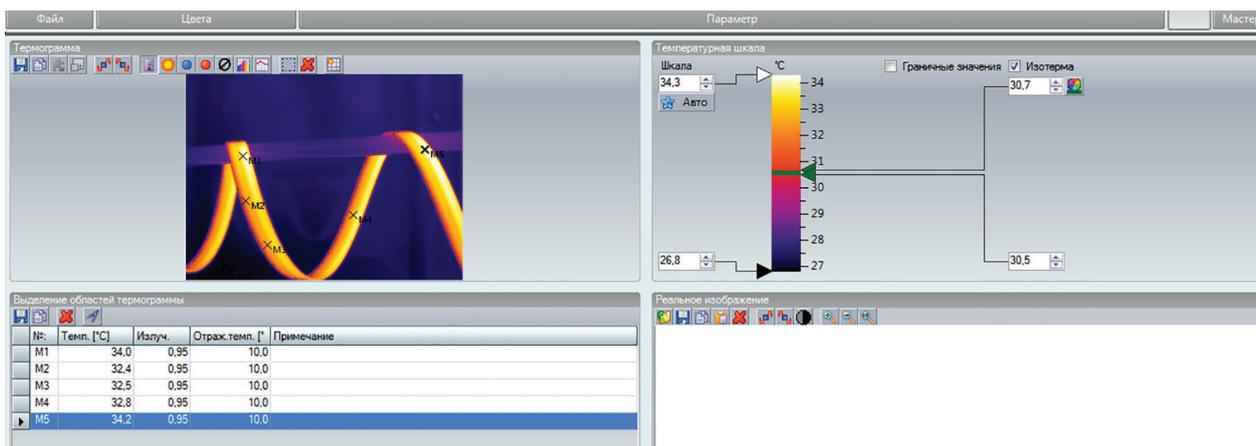


Рис. 12. Окно термограммы нагрузки физической модели установки с элементом нагревательным гибким ленточным в новом режиме с питанием ТСФ без постоянной составляющей через 7 минут нагрева (температура в точках M1 — 34,0 °C; M2 — 32,4 °C; M3 — 32,5 °C; M4 — 32,8 °C; M5 — 34,2 °C)

лей электротехнического устройства: повышение значения коэффициента мощности в сравниваемых режимах составило соответственно: 0,245; 0,255; 0,71 и 0,71. Коэффициент излучения для исследуемого электротехнического устройства типа ЭНГЛ-2 во всех опытах составил 0,95.

Для исследования процессов в элементе нагревательном гибком ленточном принята гипотеза о возникновении на поверхности металла (тонкой пластины, проволоки) двойного электрического слоя (ДЭС) из-за поляризации атомов твердого тела при воздействии извне. Подобные

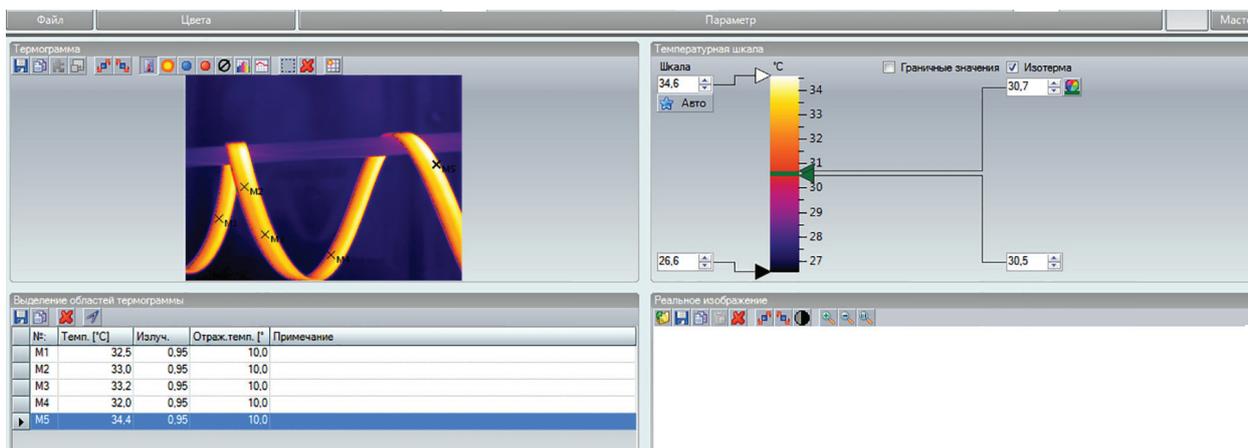


Рис. 13. Окно термограммы нагрузки физической модели установки с элементом нагревательным гибким ленточным в новом режиме с питанием ТСФ без постоянной составляющей через 10 минут нагрева (температура в точках M1 — 32,5 °C; M2 — 33,0 °C; M3 — 33,2 °C; M4 — 32,0 °C; M5 — 34,4 °C)

ДЭС выявлены в области контакта полупроводников р и n-типов — это область р-n-перехода. В приэлектродных областях электролизных установок так же возникает ДЭС. Из-за нарушения квазинейтральности плазмы на поверхности столба разряда образуется ДЭС. Разумно допустить, что осцилляции в ДЭС обусловлены колебаниями диполей, образованных в результате поляризации атомов в узлах кристаллической решетки под действием внешнего электрического поля. Поле вызывает в материале поляризацию, пропорциональную его напряженности. Колеблющийся электрический диполь является простейшей системой, излучающей электромагнитные волны. Сильнее всего диполь излучает в направлениях, перпендикулярных к его оси. Если в ДЭС твердого тела поляризованные заряды ионных сердцевин совершают осцилляции с одинаковой частотой, но разными фазами, то результирующая амплитуда оказывается в  $N$  раз больше интенсивности отдельного колебания диполя в ДЭС на поверхности твердого тела. Новое поле, интерферируя со старым, изменяет его. На осциллятор действуют внешнее электрическое поле и волны, излученные другими атомами. При этом нагретое тело интенсивно излучает электромагнитные волны, то есть тепловая энергия нагретого тела на его поверхности превращается в энергию электромагнитных колебаний. Исследованиями установлено, электромагнитная составляющая, наряду с температурной, влияет на подвижность заряженных частиц. Это повышает эффективность процессов электрообогрева (при той же скорости подъема температуры) и проявляется в увеличении коэффициента мощности установки (табл. 1, табл. 2, рис. 1–13).

Полученные результаты экспериментальных исследований совпадают с выводами в [7, 8]. В [7, 8] установлено повышение интенсивности излучения ИК-излучателя при питании током сложной формы, что проявляется в увеличении выхода фотонов с поверхности диффузора при снижении мощности, потребляемой из сети и повышении коэффициента мощности.

В [7, 8] представлены результаты исследований и газоразрядных излучателей низкого дав-

ления. Выход фотонов с поверхности диффузора для газоразрядных излучателей возрос за счет электромагнитной составляющей при питании ТСФ.

**Выводы.** Принятая гипотеза не противоречит результатам экспериментов. В новом электрическом режиме при питании ТСФ при совпадении частоты собственных колебаний заряженных частиц с частотой внешней вынуждающей силы увеличивается амплитуда колебаний поляризованных диполей на поверхности элемента нагревательного гибкого ленточного, интенсивность излучения при снижении напряжения не изменяется.

При обеспечении одинаковой скорости подъема температуры в сравниваемых режимах трансформатор в новом режиме работает на более низкой ступени ПБВ. А за счет снижения потребления реактивной мощности имеет место повышение коэффициента мощности установки с 0,245 до 0,72.

Результатами теоретических и экспериментальных исследований в электротехническом устройстве на примере элемента нагревательного гибкого ленточного типа ЭНГЛ-2 установлено повышение энергоэффективности работы в режиме с питанием ТСФ, что проявляется в повышении коэффициента мощности установки.

#### Библиографический список

- Osipov D. S., Kovalenko D. V., Dolgikh N. N. Calculation of currents resonance at hinger harmonics in power supply systems based on wavelet packet transform // 2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239492.
- Girshin S. S., Gorjunov V. N., Bigun A. Ya., Petrova E. V., Kuznetsov E. A. Overhead power line heating dynamic processes calculation baset on the heat transfer quadratic model // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/dynamics.2016.7819013.
- Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Кувалдин А. Б. [и др.]. Проектирование и эксплуатация систем электри-

ческого обогрева в нефтегазовой отрасли. М.: Инфра-Инженерия, 2015. 328 с. ISBN 978-5-9729-0086-2.

4. Рубцов В. П., Рубцов М. В., Зубарев М. С. Система зонального электрообогрева криогенных регулирующих аппаратов // Промышленный электрообогрев и электроотопление. 2013. № 1. С. 26–29.

5. Kuvaldin A. B., Fedin M. A., Strupinskiy M. L., Khrenkov N. N. Development and research of characteristics of linear inductors for heating of steel ferromagnetic plates and tubes // *Asta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved)*. 2018. Vol. 63 (3). P. 459–466.

6. Кувалдин А. Б., Струпинский М. Л., Хренков Н. Н. [и др.]. Расчет электрических и энергетических характеристик стержневого индуктора для нагрева ферромагнитной загрузки // *Электричество*. 2009. № 10. С. 54–61.

7. Ptitsyna E., Kuvaldin A., Ptitsyn D. Research of light and dark infrared radiators and low pressure gas discharge radiators in different electric modes // *Electrotechnologies for Material Processing: XVIII International UIE-Congress*, June 6–9, 2017. Hannover, Germany, 2017. P. 497–502.

8. Птицына Е. В., Птицын Д. В., Кувалдин А. Б. Низковольтные электродные водоподогреватели с питанием током сложной формы // *Омский научный вестник*. 2018. № 2 (158). С. 20–27. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-20-27.

9. Сайт ООО «Терм». URL: <https://www.obogrev.net/> (дата обращения: 12.01.2019).

**ПТИЦЫНА Елена Витальевна**, доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), член-корреспондент Российской академии электротехнических наук.

SPIN-код: 4415-9705

AuthorID (РИНЦ): 416340

AuthorID (SCOPUS): 6505863985

ORCID: 0000-0003-0670-2735

Адрес для переписки: [evptitsyna@yandex.ru](mailto:evptitsyna@yandex.ru)

**ПТИЦЫН Дмитрий Вячеславович**, ассистент кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ОмГТУ.

SPIN-код: 9900-1944

AuthorID (РИНЦ): 1004477

AuthorID (SCOPUS): 57193875922

Адрес для переписки: [ptitsyndv@mail.ru](mailto:ptitsyndv@mail.ru)

**КУВАЛДИН Александр Борисович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», академик Российской академии электротехнических наук.

SPIN-код: 4507-4908

AuthorID (РИНЦ): 250862

AuthorID (SCOPUS): 6602546889

ORCID: 0000-0003-3930-0521

Адрес для переписки: [a.kuvaldin2013@yandex.ru](mailto:a.kuvaldin2013@yandex.ru)

#### Для цитирования

Птицына Е. В., Птицын Д. В., Кувалдин А. Б. Элемент нагревательный гибкий ленточный с питанием током сложной формы // *Омский научный вестник*. 2019. № 2 (164). С. 36–44. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-36-44.

Статья поступила в редакцию 25.01.2019 г.

© Е. В. Птицына, Д. В. Птицын, А. Б. Кувалдин