

РАБОТА СМЕШАННОЙ НАГРУЗКИ В РЕЖИМЕ С ПИТАНИЕМ ТОКОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В статье на примере смешанной нагрузки с питанием током сложной формы, подключенной к узлу питания (на физической модели электрической печи сопротивления косвенного и прямого нагрева с темными инфракрасными излучателями и энергосберегающими источниками света, и низковольтного электродного водоподогревателя и энергосберегающими источниками света), представлены результаты экспериментальных исследований энергетических, технологических параметров нагрузки в установившемся режиме после коммутации в сети. Цель работы — исследование электрических режимов смешанной нагрузки в узле питания (электротехнологических и осветительных установок) для разработки рекомендаций по выбору эффективных режимов работы смешанной нагрузки при питании током сложной формы для разработки автоматизированных систем управления. Установлено: смешанная нагрузка с питанием током сложной формы продолжает работать в эффективном режиме после коммутации в сети. Для повышения эффективности управления смешанной нагрузкой необходимо использовать два канала регулирования: по амплитуде напряжения [тока] и по спектру частот.

Ключевые слова: электрическая печь сопротивления прямого и косвенного нагрева, ток сложной формы, низковольтный электродный водоподогреватель, темный инфракрасный излучатель, источник света.

Термические цехи машиностроительных заводов имеют несколько термических отделений, где размещены разные типы печей для обработки однотипных изделий. Плавильные отделения могут быть оборудованы печами сопротивления. Питание печей осуществляется от комплектных трансформаторных подстанций. С шин трансформаторных подстанций питается силовая и осветительная нагрузка цеха. Электротехнологические установки (ЭТУ) представляют собой комплекс оборудования, различного по назначению, принципам действия. В любой установке необходимо получать изделие высокого качества при оптимальных экономических показателях и безопасном управлении. Режим работы зависит от особенностей технологического процесса: циклический, методический. Включение и отключение других установок могут вывести ЭТУ из оптимального режима работы. В состав ЭТУ входят: источник питания; печь; аппаратура управления; коммутационная аппаратура; система автоматического регулирования. Все это позволяет производить переключения установок по определенной программе, учитывая сигналы возмущения и рассогласования, поступающие на регулирующий орган системы управления. Правильное размещение оборудования, выбор схемы электроснабжения,

выбор электрического режима и системы управления может повысить производительность ЭТУ и эффективность работы установки в целом [1–5]. Совершенствование электрического режима — перспективное направление. В [6–8] доказано, что электромагнитная составляющая наряду с температурной составляющей влияет на подвижность заряженных частиц и повышает эффективность процессов в электрических печах сопротивления (ЭПС) прямого и косвенного нагрева. В настоящей статье исследована работа смешанной нагрузки на примере физической модели низковольтного электродного водоподогревателя (электрическая печь сопротивления прямого нагрева), источников света и ЭПС с темными инфракрасными (ИК) — излучателями и источников света при работе в обычном и новом электрическом режиме с питанием током сложной формы (ТСФ) в установившемся режиме после коммутации в питающей сети.

В работах [6–8] рассмотрено повышение эффективности отдельных типов электротехнологических установок при переводе их в новый электрический режим: с питанием ТСФ с постоянной составляющей или без нее. Отмечено, что в новом электрическом режиме в электролизных установках имеет место снижение температуры нагрева электролита,

уменьшение количества вводимых поверхностно-активных веществ, увеличение выхода металла по току, снижение удельного расхода электроэнергии за счет уменьшения напряжения на электролизере. В дуговых сталеплавильных печах малой емкости прямого и косвенного нагрева отмечено повышение устойчивости горения дуги; снижение потерь в короткой сети; уменьшение расхода ферросплавов и электродов, шума и вредных выбросов, уменьшения напряжения на дуге [6, 8].

В ЭПС прямого и косвенного нагрева повышение эффективности также возможно за счет совершенствования электрического режима: при использовании ТСФ. Использовали темные ИК — излучатели керамические «НОМАКОН» типа ИКН-203-0,1/230-2 мощностью 100 Вт с плоской излучающей поверхностью 60×60 мм, а в качестве светлых излучателей — температурные излучатели мощностью 100 Вт. Характерными представителями ЭПС прямого нагрева являются графитировочные печи. Процессы длительные (до 100 ч) высокотемпературные (2300–2800 °С). КПД установок составляет 0,5–0,6, а коэффициент мощности порядка 0,6–0,75 [7, 8]. Лабораторные исследования на физических моделях печей обжига «зеленых» заготовок показали, что в режиме с питанием ТСФ на стадии обжига «зеленых» заготовок имело место формирование структуры графита. Температура нагрева в печи была 100 °С. Коэффициент мощности возрос с 0,965 до 0,975 [8].

В экспериментах в качестве смешанной нагрузки исследованы:

1) ЭПС косвенного нагрева — физическая модель ЭПС с темным ИК-излучателем мощностью 100 Вт и осветительная нагрузка — энергосберегающий источник света типа LUXRAY мощностью 20 Вт;

2) ЭПС прямого нагрева — физическая модель низковольтного электродного водоподогревателя (объем питьевой воды 500 мл, электроды пластинчатые 18×90 мм) и осветительная нагрузка — энергосберегающий источник света типа LUXRAY мощностью 20 Вт.

Целью работы является исследование электрических режимов смешанной нагрузки в узле питания (электротехнологической и осветительной); источников света и установок с темными ИК-излучателями; источников света и низковольтных электродных водонагревателей в установленном режиме после коммутации в сети, для разработки рекомендаций по выбору эффективных режимов работы смешанной нагрузки с питанием ТСФ и разработки алгоритмических основ системы автоматического управления.

Опыты выполнены в сравнении двух электрических режимов: обычного с питанием переменным током частотой 50 Гц, нового — с питанием током сложной формы без постоянной составляющей для исключения электролиза воды в водоподогревателе. В обычном режиме питание темного ИК-излучателя и низковольтного электродного водоподогревателя реализовано от однофазного трансформатора 220/130 В переменным током частотой 50 Гц. В новом режиме с питанием ТСФ без постоянной составляющей дополнительно включали нелинейную индуктивность дроссель для изменения формы тока (напряжения).

В качестве объекта исследования использован темный ИК-излучатель — выпускают серии ИКН-100, ИКН-200, ИКН-300, которые выполнены

из высокоглиноземистых шамотов с содержанием оксида — 72 %. Излучатели бывают обычного исполнения (1) и с встроенным датчиком температуры излучающей поверхности (2). Термодатчик ТХА — это хромель-алюмелевый преобразователь типа «К» (NiCr–NiAl) с контактными выводами. Все излучатели ИКН покрыты глухой матовой ангобированной керамической глазурью на основе оксида циркония, которая не чувствительна к пыли и органическим загрязнениям, а также к влажности. В работе качестве темных ИК-излучателей использовали керамические излучатели «НОМАКОН» типа ИКН-203-0,1/230-2 мощностью 100 Вт с плоской излучающей поверхностью 60×60 мм [7].

В качестве современных источников света выбраны: энергосберегающая лампа LUXRAY мощностью 20 Вт. Энергосберегающая лампа LUXRAY является люминесцентной лампой низкого давления тлеющего разряда. Люминофор на поверхности колбы преобразует излучение электрического разряда в видимое излучение. Лампы широко используются на предприятиях вместо температурных излучателей и рекомендованы по программе энергосбережения по результатам аудиторских проверок.

Приборы. Для исследования электрических параметров силовой и осветительной нагрузки использовали анализатор качества электрической энергии типа ANALYST 2060. Для измерения параметров источников света использовали высокочувствительный оптоволоконный спектрометр с ультранизким рассеянием света AvaSpec-ULS 2048-USB2, в комплекте которого предусмотрено универсальное программное обеспечение AvaSoft-ALL (фирма AVANTES). Для измерения температуры 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 до +100 °С (0 до +350 °С), измерение высоких температур — от +350 до +550 °С, погрешность — ±2 °С (±2 %), таймер, амперметр и вольтметр. При выполнении экспериментальных исследований измеряли тепловое поле темного ИК-излучателя 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.

Первая серия опытов. В табл. 1 даны параметры, характеризующие работу смешанной нагрузки: энергосберегающей лампы LUXRAY 20 Вт и темного ИК-излучателя НОМАКОН мощностью 100 Вт в обычном и новом электрических режимах, подключаемых одновременно в узле питания. На рис. 1–4 даны окна термограмм, отражающие характер изменения температуры каждого элемента смешанной нагрузки в обычном электрическом режиме и новом режиме с питанием ТСФ без постоянной составляющей.

Экспериментально подтверждено, что при подключении в узле питания смешанной нагрузки (энергосберегающей лампы 20 Вт и темного ИК-излучателя НОМАКОН 100 Вт) в новом режиме с питанием ТСФ при одинаковой скорости

Показатели работы смешанной нагрузки: энергосберегающей лампы
и темного ИК-излучателя НОМАКОН при различных электрических режимах

Наименование электрического режима	Мощность из сети			Коэффициент мощности	Ток в нагрузке, В
	Активная, P, кВт	Реактивная, Q, квар	Полная, S, кВА		
1. Обычный режим: переменный ток, 50 Гц	0,047	0,091	0,102	0,46	0,30
2. Новый режим: ТСФ без постоянной составляющей	0,040	0,015	0,043	0,93	0,30

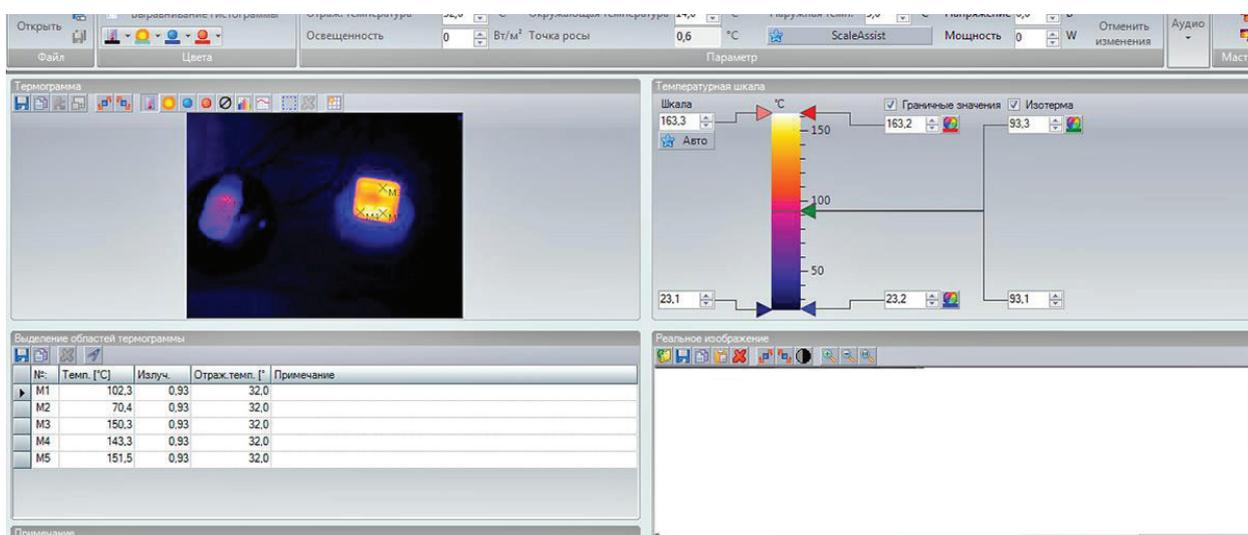


Рис. 1. Окно термограммы смешанной нагрузки физической модели установки с темным ИК-излучателем и энергосберегающей лампой в обычном режиме: переменный ток частота 50 Гц (для лампы температура в точках M1 — 102,3 °C и M2 — 70,4 °C, для ИК-излучателя: в точках M3 — 150,3 °C, M4 — 143,3 °C, M5 — 151,5 °C)

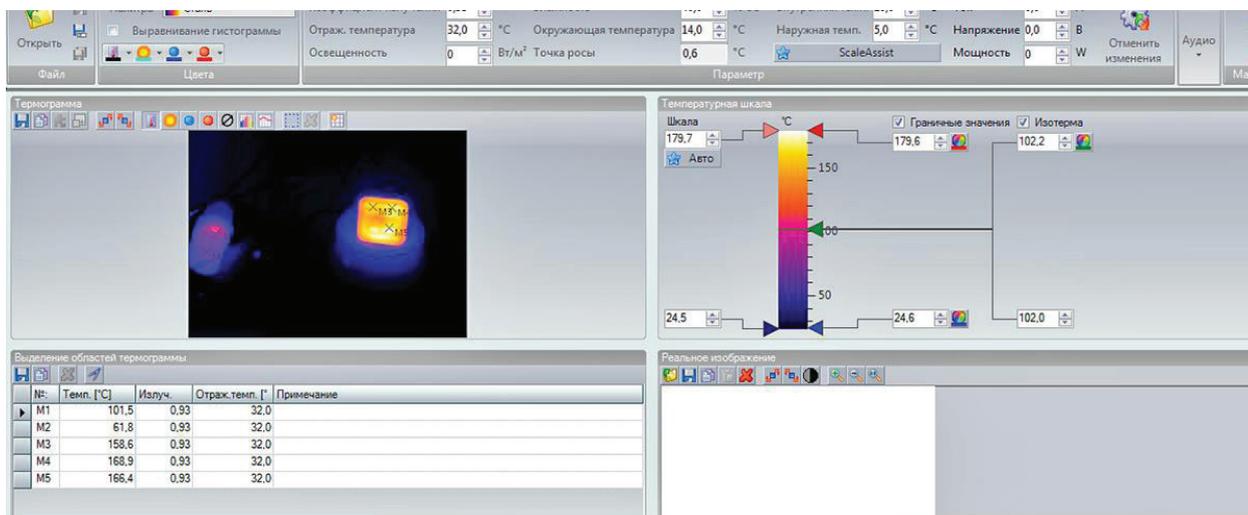


Рис. 2. Окно термограммы смешанной нагрузки физической модели установки с темным ИК-излучателем и энергосберегающей лампой в обычном режиме: переменный ток частота 50 Гц (для лампы температура в точках M1 — 101,5 °C и M2 — 61,8 °C, для ИК-излучателя: в точках M3 — 158,6 °C, M4 — 168,9 °C, M5 — 166,4 °C)

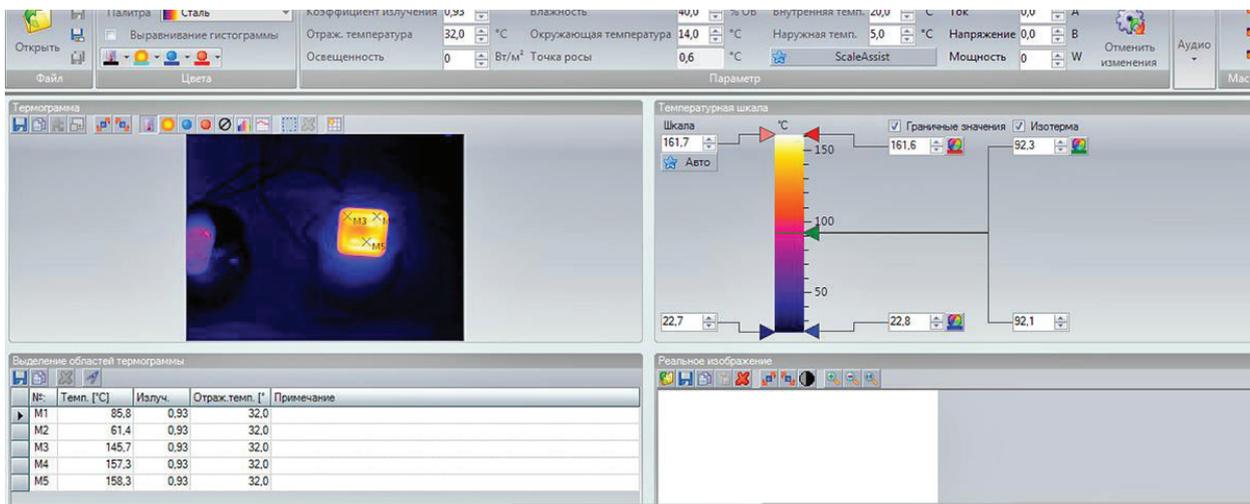


Рис. 3. Окно термограммы смешанной нагрузки физической модели установки с темным ИК-излучателем и энергосберегающей лампой в новом режиме: ТСФ (для лампы температура в точках M1 — 85,8 °C и M2 — 61,4 °C, для ИК-излучателя: в точках M3 — 145,7 °C, M4 — 157,3 °C, M5 — 158,3 °C)

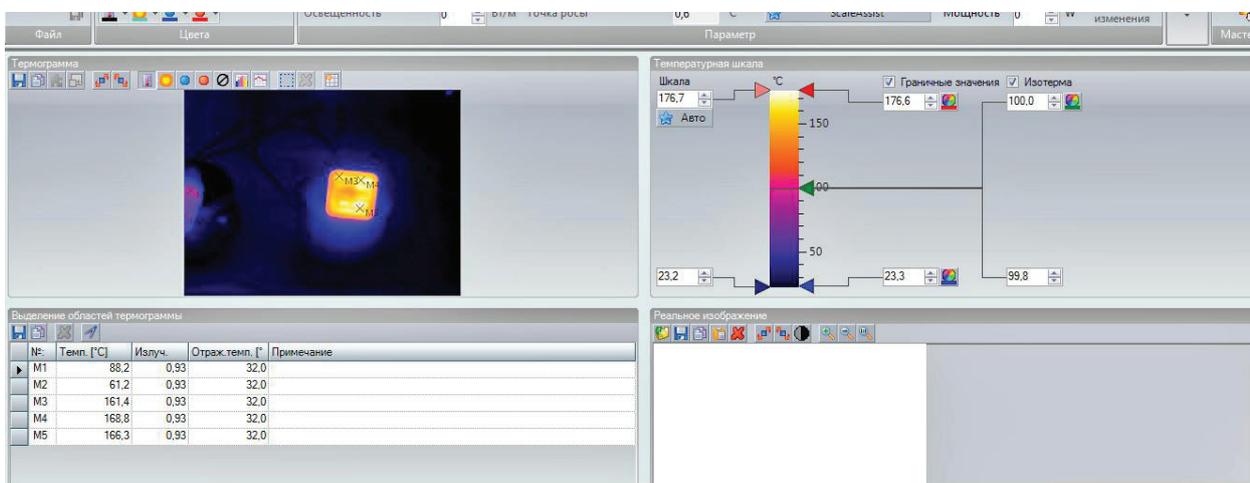


Рис. 4. Окно термограммы смешанной нагрузки физической модели установки с темным ИК-излучателем и энергосберегающей лампой в новом режиме: ТСФ (для лампы температура в точках M1 — 88,2 °C и M2 — 61,2 °C, для ИК-излучателя: в точках M3 — 161,4 °C, M4 — 168,8 °C, M5 — 166,3 °C)

Таблица 2

Показатели работы в новом электрическом режиме в узле нагрузки энергосберегающей лампы 20 Вт при включении и отключении темного ИК-излучателя НОМАКОН

Наименование электрического режима	Мощность из сети			Коэффициент мощности	Ток в нагрузке, В
	Активная, P , кВт	Реактивная, Q , квар	Полная, S , кВА		
1. Новый режим: ТСФ без постоянной составляющей	0,039	0,015	0,042	0,92	0,30
2. Новый режим: ТСФ без постоянной составляющей	0,012	0,016	0,020	0,60	0,10

подъема температуры в каждой из указанных нагрузок одновременно улучшаются энергетические показатели: коэффициент мощности *смешанной нагрузки* увеличился с 0,46 до 0,928.

В табл. 2 даны составляющие мощности, потребляемой из сети, и значения коэффициента мощности **для нового электрического режима с питанием ТСФ** без постоянной составляющей в узле нагруз-

Показатели работы в новом электрическом режиме в узле нагрузки темного ИК-излучателя НОМАКОН мощностью 100 Вт при включении и отключении энергосберегающей лампы мощностью 20 Вт

Наименование электрического режима	Мощность из сети			Коэффициент мощности	Ток в нагрузке, В
	Активная, P , кВт	Реактивная, Q , квар	Полная, S , кВА		
1. Новый режим: ТСФ без постоянной составляющей	0,039	0,0126	0,041	0,95	0,30
2. Новый режим: ТСФ без постоянной составляющей	0,030	0,0160	0,034	0,88	0,2 *Лампа отключена

Таблица 4

Показатели работы смешанной нагрузки: энергосберегающей лампы 20 Вт и низковольтного электродного водоподогревателя при различных электрических режимах

Наименование электрического режима	Мощность из сети			Коэффициент мощности	Ток в нагрузке, В
	Активная, P , кВт	Реактивная, Q , квар	Полная, S , кВА		
1. Обычный режим: переменный ток, 50 Гц	0,075	0,092	0,119	0,63	0,51
2. Новый режим: ТСФ без постоянной составляющей	0,071	0,016	0,073	0,97	0,51

ки для следующих моментов: а) включены энергосберегающая лампа 20 Вт и темный ИК-излучатель НОМАКОН мощностью 100 Вт; б) отключен темный ИК-излучатель НОМАКОН и в узле включена только энергосберегающая лампа 20 Вт.

В табл. 3 даны составляющие мощности, потребляемой из сети, и значения коэффициента мощности для нового электрического режима с питанием ТСФ без постоянной составляющей в узле нагрузки: а) включены энергосберегающая лампа 20 Вт и темный ИК-излучатель НОМАКОН мощностью 100 Вт; б) отключена осветительная нагрузка — энергосберегающая лампа 20 Вт и в узле включен только темный ИК-излучатель. На рис. 1–4 даны окна термограмм смешанной нагрузки, отражающие подъем температуры в обычном и новом электрическом режиме для каждого потребителя.

Таким образом, сравнительный анализ данных табл. 1–3 показал, что отключение электротехнологической и осветительной нагрузки не изменяют параметры выбранного эффективного режима работы. При переключениях изменяются лишь абсолютные значения мощности и коэффициента мощности, а включенная в узле питания нагрузка продолжает работать в эффективном электрическом режиме. Следовательно, регулирование фор-

мы питающего напряжения (тока) для смешанной нагрузки целесообразно. Установлено, для смешанной нагрузки электромагнитная составляющая, наряду с температурной, влияет на подвижность заряженных частиц. Это повышает эффективность процессов в темных ИК-излучателях и источниках света (с энергосберегающими лампами и светодиодами) и проявляется в увеличении коэффициента мощности в узле питания.

Вторая серия опытов. В эксперименте смешанная нагрузка — электротехнологическая и осветительная — переводится из обычного режима с питанием переменным током частотой 50 Гц в новый электрический режим с питанием ТСФ без постоянной составляющей для исключения электролиза в низковольтном электродном водоподогревателе (табл. 4). На рис. 5–8 даны окна термограмм для указанной смешанной нагрузки в обычном и новом электрических режимах. Скорость подъема температуры в сравниваемых режимах была одинаковой.

Экспериментально установлено, что смешанная нагрузка при переводе в новый режим с питанием ТСФ без постоянной составляющей работает с более высоким значением коэффициента мощности: его значение увеличивается с 0,62 до 0,97. На рис. 9 и на рис. 10 представлены спектры излучения энер-

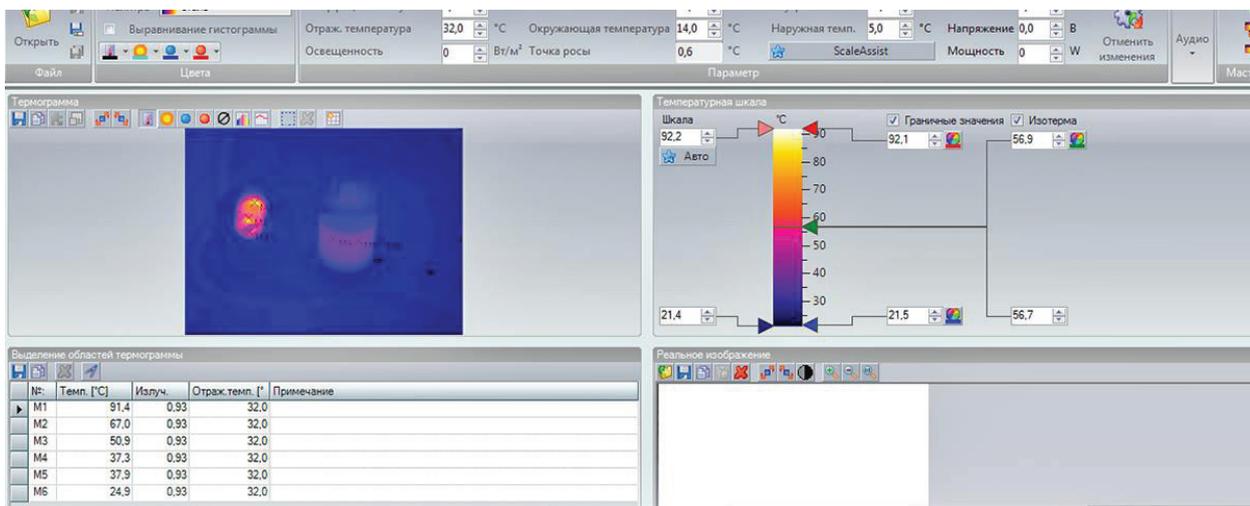


Рис. 5. Окно термограммы смешанной нагрузки физической модели электродного водоподогревателя и энергосберегающей лампы в обычном режиме: переменный ток частота 50 Гц (для лампы температура в точках M1 — 91,4 °C и M2 — 67,0 °C, M3 — 50,9 °C, для водоподогревателя: в точках M4 — 37,3 °C, M5 — 37,9 °C, M6 — 24,9 °C)

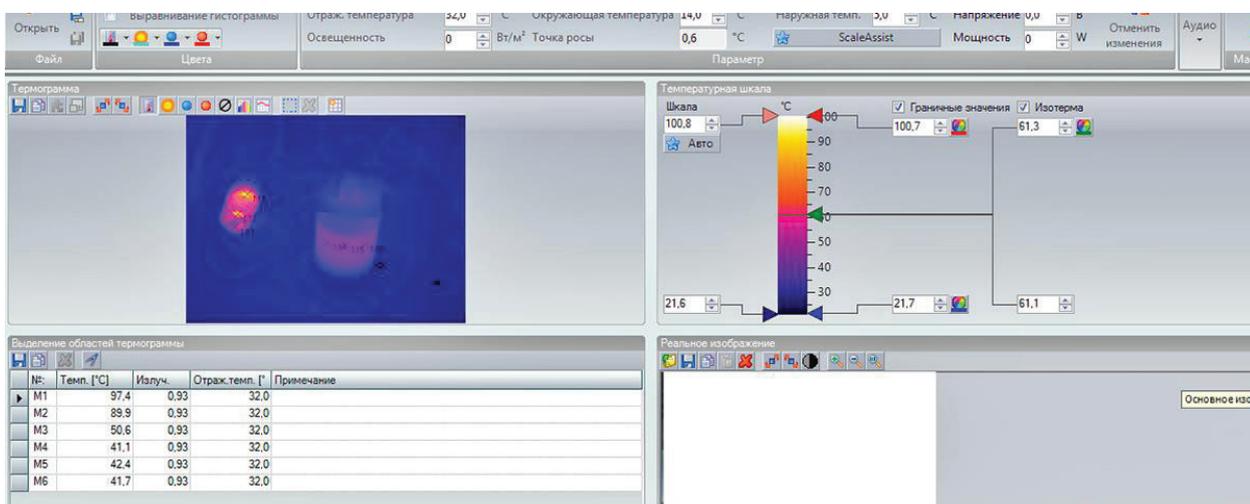


Рис. 6. Окно термограммы смешанной нагрузки физической модели электродного водоподогревателя и энергосберегающей лампы в обычном режиме: переменный ток частота 50 Гц (для лампы температура в точках M1 — 97,4 °C и M2 — 89,8 °C, M3 — 50,6 °C, для водоподогревателя: в точках M4 — 41,1 °C, M5 — 42,4 °C, M6 — 41,7 °C)

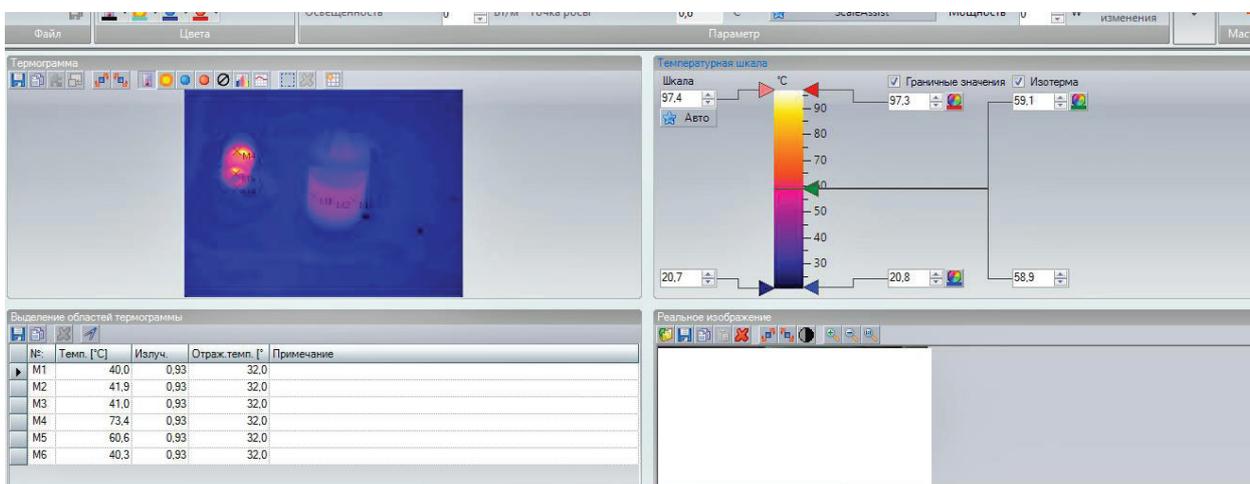


Рис. 7. Окно термограммы смешанной нагрузки физической модели электродного водоподогревателя и энергосберегающей лампы в новом режиме: ТСФ без постоянной составляющей (для лампы температура в точках M1 — 73,4 °C и M2 — 60,6 °C, M3 — 40,3 °C, для водоподогревателя: в точках M4 — 40,0 °C, M5 — 41,9 °C, M6 — 41,0 °C)

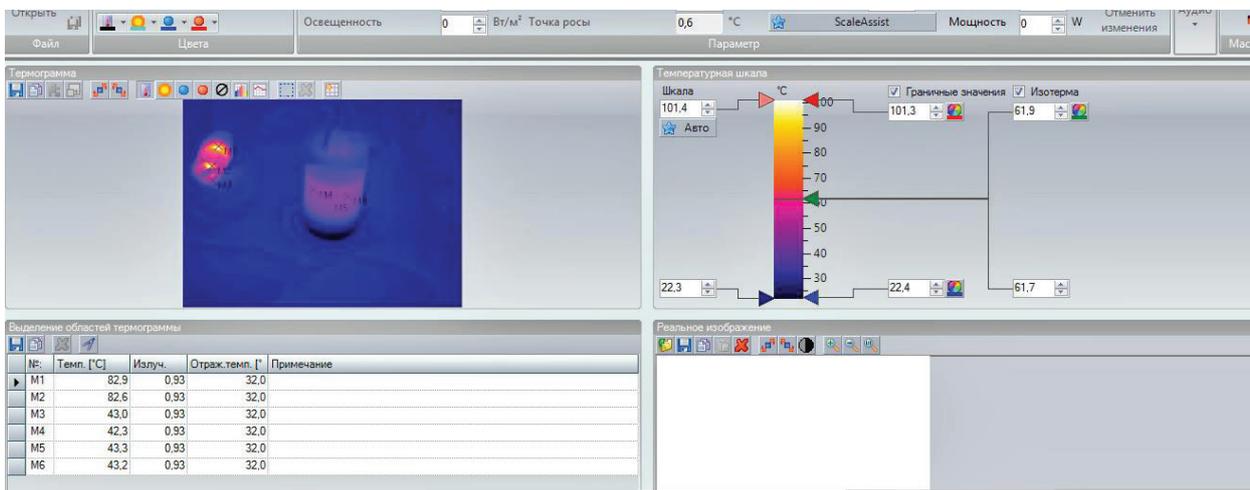


Рис. 8. Окно термограммы смешанной нагрузки физической модели электродного водоподогревателя и энергосберегающей лампы в новом режиме: ТСФ без постоянной составляющей (для лампы температура в точках M1 — 82,9 °C и M2 — 82,6 °C, M3 — 43,0 °C, для водоподогревателя: в точках M4 — 42,3 °C, M5 — 43,3 °C, M6 — 43,2 °C)

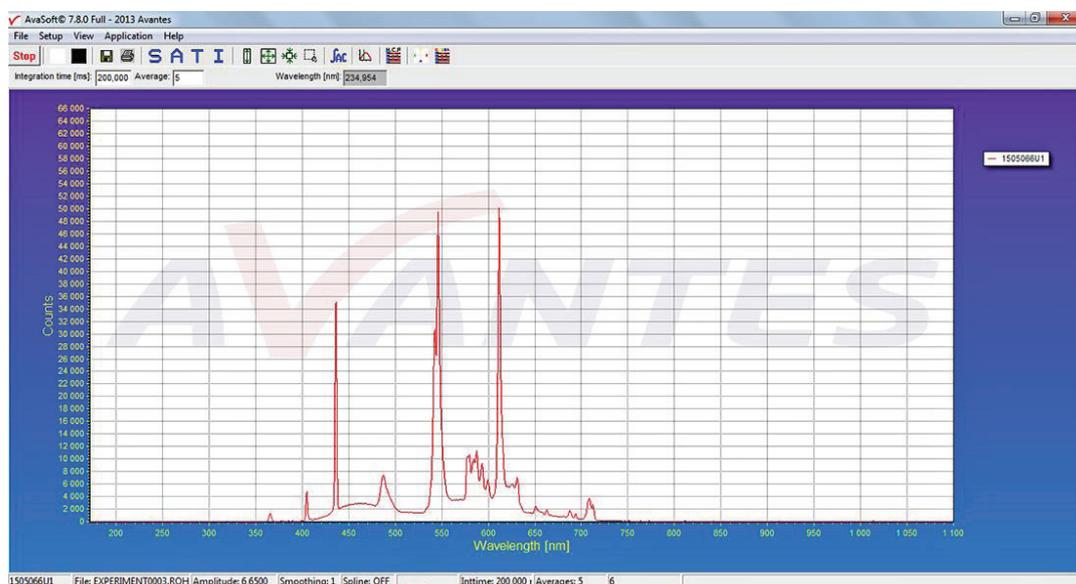


Рис. 9. Окно спектра излучения лампы LUXRAY 20 Вт в узле питания (подключены электродный водоподогреватель и энергосберегающая лампа) в обычном режиме частота 50 Гц

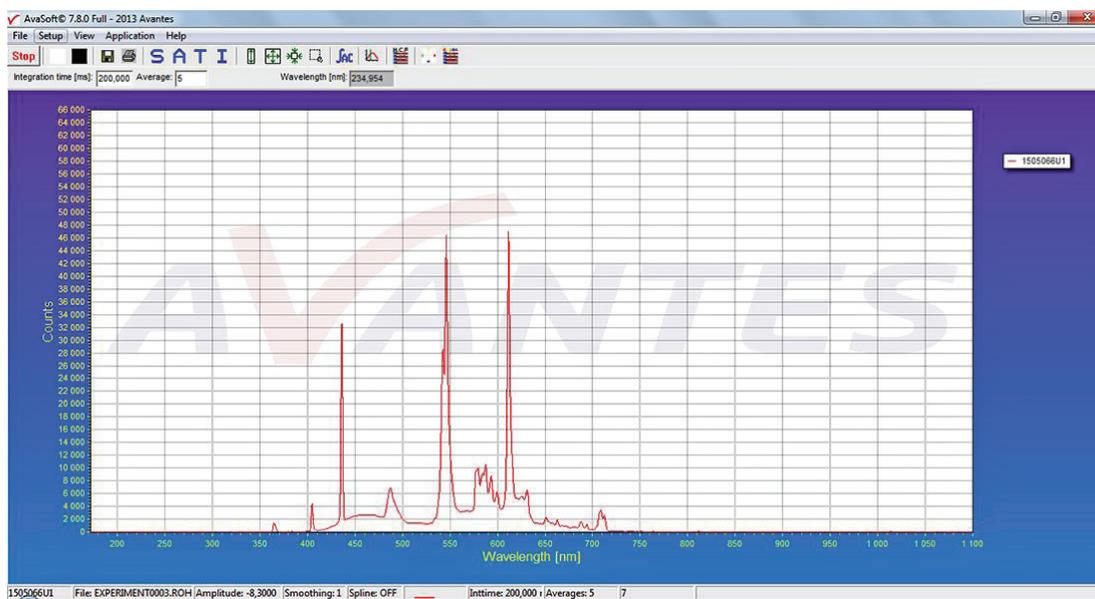


Рис. 10. Окно спектра излучения лампы LUXRAY 20 Вт в узле питания (подключены электродный водоподогреватель и энергосберегающая лампа) в новом режиме с питанием ТСФ

госберегающей лампы LUXRAY 20 Вт в обычном и новом электрических режимах при подключении к узлу питания низковольтного электродного водонагревателя и энергосберегающей лампы LUXRAY 20 Вт.

Интенсивность спектральных линий для указанных длин волн в обоих режимах практически не менялась (430 нм — 35000 (33000), 550 нм — 50000 (46000), 620 нм — 51000 (47000)), значения цветовой температуры в указанных режимах были одинаковы 3116,9 К и 3104,2 К; а выход фотонов с поверхности диффузора составил соответственно $3,051 \cdot 10^{-5}$ и $2,977 \cdot 10^{-5}$ μMol . Значение коэффициента мощности смешанной нагрузки в узле питания увеличилось, то есть эффективность работы смешанной нагрузки в новом режиме возросла.

Выводы. Результатами экспериментальных исследований в узле питания смешанной нагрузки на примере низкотемпературных электродных водоподогревателей и энергосберегающей лампы установлено повышение энергоэффективности указанной смешанной нагрузки. Принята гипотеза, что в новом электрическом режиме при применении ТСФ без постоянной составляющей, при совпадении частоты собственных колебаний молекул воды с частотой внешней вынуждающей силы увеличивается амплитуда колебаний и перемещений, возрастает подвижность молекул воды. При ТСФ возрастают кинетическая энергия молекул и число соударений, что обуславливает увеличение скорости подъема температуры. 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 смешанной нагрузки (электродного водоподогревателя и энергосберегающей лампы LUXRAY 20 Вт) в узле питания с 0,63 до 0,97.

Библиографический список

1. Миронов Ю. М., Миронова А. Н. Особенности характеристик дуговых сталеплавильных печей при их питании переменным током пониженной частоты // *Электротехнология*. 2015. № 11. С. 2–8.
2. Нехамин С. М., Лунин А. Г., Крутянский М. М. [и др.]. Электродуговые агрегаты постоянного тока // *Электротехнология*. 2005. № 11. С. 2–4.
3. Нехамин С. М., Котюк А. В., Фридман М. А. [и др.]. Автоматизированная рудовосстановительная печь постоянного тока // *Электротехнология*. 2001. № 3. С. 25–27.

4. Нехамин С. М., Лунин А. Г., Крутянский М. М. [и др.]. Дуговые плавильные агрегаты постоянного тока // *Новые огнеупоры*. 2004. № 11. С. 13.

5. Миронов Ю. М. Влияние сопротивлений вторичного токоподвода на свойства дуговой сталеплавильной печи как приемника и преобразователя электроэнергии // *Электротехнология*. 2009. № 5. С. 13–18.

6. Птицына Е. В., Кувалдин А. Б. Работа дуговых печей небольшой емкости при питании током сложной формы // *Электротехнология*. 2006. № 2. С. 26–36.

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.

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

Адрес для переписки: evptitsyna@yandex.ru

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

Адрес для переписки: 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

Адрес для переписки: a.kuvaldin2013@yandex.ru

Для цитирования

Птицына Е. В., Птицын Д. В., Кувалдин А. Б. Работа смешанной нагрузки в режиме с питанием током сложной формы // *Омский научный вестник*. 2018. № 4 (160). С. 47–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-47-54.

Статья поступила в редакцию 01.06.2018 г.

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