

УДК 628.81:621.314

## ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЭЛЕКТРООТОПЛЕНИИ ПОМЕЩЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА

Тищенко А.О., аспирант,\*

Буряк А.В., аспирант.\*

*Таврический государственный агротехнологический университет*

Тел. (0619) 42-32-63

**Аннотация** – приведены результаты аналитического исследования тепловых процессов при электрическом отоплении помещений с использованием электронагревателей трансформаторного типа.

**Ключевые слова** – тепловой процесс, электронагреватель, электрическое отопление, трансформатор, тепловые проводимости, тепловые сопротивления, установившиеся превышения температуры.

*Постановка проблемы.* В настоящее время все чаще для отопления и горячего водоснабжения жилых зданий и помещений используется электрическая энергия. В качестве преобразователей электрической энергии в тепловую используются трубчатые электронагреватели. Последние в течение эксплуатации покрываются шламом, ухудшается их теплоотдача и по этой причине они часто выходят из строя. Поэтому требуется разработка электронагревателей более надежной конструкции.

*Анализ последних достижений.* В этом направлении разрабатываются электронагреватели различных типов. Например, преобразователь электрической энергии в тепловую типа “катушка в стали”, преобразователь с низкотемпературным нагревом [1, 2] и другие.

*Формулировка целей статьи.* Поэтому целью данной статьи является разработка электронагревателя трансформаторного типа, обладающего рядом преимуществ по сравнению с известными, и исследование его работы в электроотопительной системе.

*Основная часть.* С определенным допущением принимаем электроотопительную систему, состоящую из трех тел:

- тело 1 – электронагреватель трансформаторного типа, активным элементом которого является короткозамкнутая труба определенного сечения, через которую проходит теплоноситель (вода);
- тело 2 – водяная отопительная система, активным элементом которой являются отопительные батареи;
- тело 3 – отапливаемое помещение, приемником тепловой энергии которого являются воздух внутри помещения, мебель, стены.

---

\* Научный руководитель – д.т.н., проф. Овчаров В.В.

© аспирант Тищенко А.А., аспирант Буряк А.В.

Каждое из тел обладает соответствующей теплоемкостью:  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ . Между телами существуют тепловые проводимости:  $L_{12}$ ,  $L_{23}$ ,  $L_3$ . В первом теле выделяется активная мощность  $P_1$ . Каждое тело по отношению к температуре наружного воздуха имеет соответствующее превышение температуры:  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ . Температура окружающей среды принята постоянной, а теплоемкость окружающей среды принята равной бесконечности. Тепловая схема замещения описанной отопительной системы приведена на рис.1.

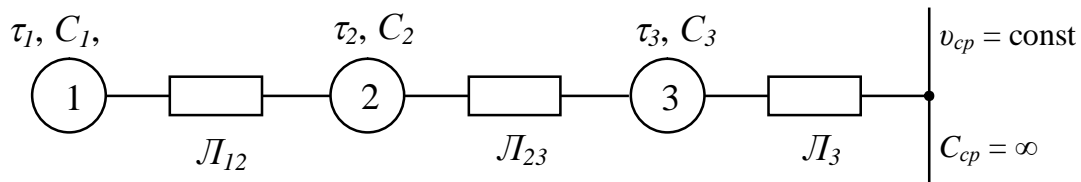


Рис.1. Тепловая схема замещения электроотопительной системы.

Составляем уравнения теплового баланса для каждого из трех тел:

$$C_1 \frac{d\tau_1}{dt} + L_{12}(\tau_1 - \tau_2) = P_1; \quad (1)$$

$$C_2 \frac{d\tau_2}{dt} + L_{23}(\tau_2 - \tau_3) = L_{12}(\tau_1 - \tau_2); \quad (2)$$

$$C_3 \frac{d\tau_3}{dt} + L_3 \tau_3 = L_{23}(\tau_2 - \tau_3). \quad (3)$$

Запишем уравнения (1)–(3) в установившемся режиме:

$$L_{12}(\tau_{1y} - \tau_{2y}) = P_1; \quad (4)$$

$$-L_{12}(\tau_{1y} - \tau_{2y}) + L_{23}(\tau_{2y} - \tau_{3y}) = 0; \quad (5)$$

$$-L_{23}(\tau_{2y} - \tau_{3y}) + L_3 \tau_{3y} = 0. \quad (6)$$

Преобразуем уравнения (4)–(6):

$$L_{12}\tau_{1y} - L_{12}\tau_{2y} + 0 = P_1; \quad (7)$$

$$-L_{12}\tau_{1y} + (L_{12} + L_{23})\tau_{2y} - L_{23}\tau_{3y} = 0; \quad (8)$$

$$0 - L_{23}\tau_{2y} + (L_{23} + L_3)\tau_{3y} = 0. \quad (9)$$

Для решения уравнений (7)–(9) воспользуемся методом определителей, для чего найдем главный и частные определители:

$$\Delta = \begin{vmatrix} L_{12} & -L_{12} & 0 \\ -L_{12} & (L_{12} + L_{23}) & -L_{23} \\ 0 & -L_{23} & (L_{23} + L_3) \end{vmatrix} =$$

$$= L_{12} \cdot (L_{12} + L_{23}) \cdot (L_{23} + L_3) -$$

$$- L_{12}^2 \cdot (L_{23} + L_3) - L_{23}^2 \cdot L_{12} = L_{12} \cdot L_{23} \cdot L_3; \quad (10)$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} P_1 & -L_{12} & 0 \\ 0 & (L_{12} + L_{23}) & -L_{23} \\ 0 & -L_{23} & (L_{23} + L_3) \end{vmatrix} =$$

$$= P_1 \cdot (L_{12} + L_{23}) \cdot (L_{23} + L_3) -$$

$$- P_1 \cdot L_{23}^2 = P_1 \cdot (L_{12} \cdot L_{23} + L_3 \cdot L_{12} + L_3 \cdot L_{23});$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} L_{12} & P_1 & 0 \\ -L_{12} & 0 & -L_{12} \\ 0 & 0 & (L_{23} + L_3) \end{vmatrix} =$$

$$= P_1 \cdot L_{12} \cdot (L_{23} + L_3) =$$

$$= P_1 \cdot (L_{12} \cdot L_{23} + L_3 \cdot L_{12});$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} L_{12} & -L_{12} & P_1 \\ -L_{12} & (L_{12} + L_{23}) & 0 \\ 0 & -L_{23} & 0 \end{vmatrix} = P_1 \cdot L_{12} \cdot L_{23};$$

$$\tau_{1y} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{P_1(L_{12} \cdot L_{23} + L_3 \cdot L_{12} + L_3 \cdot L_{23})}{L_{12} \cdot L_{23} \cdot L_3} =$$

$$= P_1 \left( \frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_{23}} + \frac{1}{L_{12}} \right);$$

$$\tau_{2y} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{P_1(L_{12} \cdot L_{23} + L_3 \cdot L_{12})}{L_{12} \cdot L_{23} \cdot L_3} = P_1 \left( \frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_{23}} \right);$$

$$\tau_{3y} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{P_1 \cdot L_{12} \cdot L_{23}}{L_{12} \cdot L_{23} \cdot L_3} = P_1 \frac{1}{L_3}.$$

Введем понятие термического сопротивления, под которым будем понимать величину обратно пропорциональную тепловой проводимости

$$r = \frac{1}{L}. \quad (17)$$

Перепишем уравнения (14) – (16) с учетом введенного понятия:

$$\tau_{1y} = P_1(r_3 + r_{23} + r_{12}); \quad (18)$$

$$\tau_{2y} = P_1(r_3 + r_{23}); \quad (19)$$

$$\tau_{3y} = P_1 \cdot r_3. \quad (20)$$

Преобразуем уравнения (18)–(20) к следующему виду:

$$r_3 + r_{23} + r_{12} = \frac{\tau_{1y}}{P_1}; \quad (21)$$

$$r_3 + r_{23} = \frac{\tau_{2y}}{P_1}; \quad (22)$$

$$r_3 = \frac{\tau_{3y}}{P_1}. \quad (23)$$

Введем обозначение:

$$\frac{\tau_{1y}}{P_1} = r_1; \quad (24)$$

$$\frac{\tau_{2y}}{P_1} = r_2; \quad (25)$$

$$\frac{\tau_{3y}}{P_1} = r_3. \quad (26)$$

Тогда окончательно получим:

$$r_{12} + r_{23} + r_3 = r_1; \quad (27)$$

$$0 + r_{23} + r_3 = r_2; \quad (28)$$

$$0 + 0 + r_3 = r_3. \quad (29)$$

Решив уравнения (27), (28) и (29) находим

$$r_3 = \frac{\tau_{3y}}{P_1}; \quad (30)$$

$$r_{23} = \frac{\tau_{2y}}{P_1} - \frac{\tau_{3y}}{P_1}; \quad (31)$$

$$r_{12} = \frac{\tau_{1y}}{P_1} - \frac{\tau_{2y}}{P_1}. \quad (32)$$

Анализ уравнений (30)–(32) показывает, что проводя эксперимент нагрева электроотопительной системы в установившемся режиме и замеряв величины  $\tau_{1y}$ ,  $\tau_{2y}$ ,  $\tau_{3y}$  и  $P_1$ , можно определить термические сопротивления  $r_{12}$ ,  $r_{23}$  и  $r_3$ , а следовательно, проводимости:

$$L_{12} = \frac{1}{r_{12}}; \quad (33)$$

$$L_{23} = \frac{1}{r_{23}}; \quad (34)$$

$$L_3 = \frac{1}{r_3}. \quad (35)$$

Исследуем переходный процесс нагрева электроотопительной системы, описанный уравнениями (1)–(3). Для этого запишем указанные уравнения в операторной форме:

$$(pC_1 + L_{12})\tau_1 - L_{12}\tau_2 = \frac{P_1}{p}; \quad (36)$$

$$-L_{12}\tau_1 + (pC_2 + L_{23} + L_{12})\tau_2 - L_{23}\tau_3 = 0; \quad (37)$$

$$-L_{23}\tau_2 + (pC_3 + L_{23} + L_3) = 0. \quad (38)$$

Находим превышения температуры в операторной форме:

$$\Delta = \begin{vmatrix} (pC_1 + L_{12}) & -L_{12} & P_1 \\ -L_{12} & (pC_2 + L_{23} + L_{12}) & -L_{23} \\ 0 & -L_{23} & (pC_3 + L_{23} + L_3) \end{vmatrix} = \quad (39)$$

$$= p^3m + p^2n + pk + l,$$

$$\text{где } m = C_1C_2C_3, \quad (40)$$

$$n = (C_1C_3L_{23} + C_1C_3L_{12} + C_2C_3L_{12} + C_1C_2L_{23} + C_1C_2L_3); \quad (41)$$

$$k = (C_3L_{12}L_{23} + C_1L_{12}L_{23} + C_2L_{12}L_{23} + C_1L_{23}L_3 + C_1L_{12}L_3 + C_2L_{12}L_3); \quad (42)$$

$$l = L_{12}L_{23}L_3. \quad (43)$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} \frac{P_1}{p} & -L_{12} & 0 \\ 0 & (pC_2 + L_{23} + L_{12}) & -L_{23} \\ 0 & -L_{23} & (pC_3 + L_{23} + L_3) \end{vmatrix} = \frac{p^2u + po + r}{p}; \quad (44)$$

$$\text{где } u = PC_1C_2C_3; \quad (45)$$

$$o = (PC_1C_3L_{23} + PC_1C_3L_{12} + PC_1C_2L_{23} + PC_1C_2L_3); \quad (46)$$

$$r = (PL_{12}L_{23} + PL_{23}L_3 + PL_{12}L_3); \quad (47)$$

$$\tau_1(p) = \frac{p^2u + po + r}{p(p^3m + p^2n + pk + l)}; \quad (48)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} (pC_1 + L_{12}) & \frac{P_1}{p} & 0 \\ -L_{12} & 0 & -L_{23} \\ 0 & 0 & (pC_3 + L_{23} + L_3) \end{vmatrix} = \frac{pt + g}{p}; \quad (49)$$

$$\text{где } t = PC_1C_3L_{12}; \quad (50)$$

$$g = PL_{23}L_{12} + PL_3L_{12}; \quad (51)$$

$$\tau_2(p) = \frac{pt + g}{p(p^3 m + p^2 n + pk + l)}; \quad (52)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} (pC_1 + L_{12}) & -L_{12} & \frac{P_1}{p} \\ -L_{12} & (pC_2 + L_{23} + L_{12}) & 0 \\ 0 & -L_{23} & 0 \end{vmatrix} = \frac{e}{p}; \quad (53)$$

где  $e = P_1 L_{12} L_{23}$ ; (54)

$$\tau_3(p) = \frac{e}{p(p^3 m + p^2 n + pk + l)}; \quad (55)$$

*Выводы.* Полученные аналитические выражения позволяют проводить анализ тепловых процессов в электроотопительных системах с целью их оптимизации.

#### Литература

1. *Расстригин В.Н.* Электронагревательные установки в сельскохозяйственном производстве / *В.Н. Расстригин, И.И. Дацков, Л.И. Сухарева, В.М. Голубев.* – М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с.

2. *Белавин Ю.А.* Трубчатые электрические нагреватели и установки с их применением / *Ю.А. Белавин, М.А. Евстигнеев, А.Н. Чернявский.* – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.

## ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ ПРИ ЕЛЕКТРООПАЛЕННІ ПРИМІЩЕНЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРОНАГРІВАЧІВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПУ

Тіщенко О.О., Буряк О.В.

#### Анотація

Приведені результати аналітичного дослідження теплових процесів при електричному опаленні приміщень із застосуванням електронагрівачів трансформаторного типу.

## INDORETHERMAL PROCESSES BY ELECTRICAL HEATING WITH TRANSFORMER TYPE ELECTRIC HEATER

A. Tishchenko, A. Buryak

#### Summary

There have been done the results of the analytical research of thermal processes in the electric space heating by transformer type electric heating.