

*У статті поставлена задача підвищення енергоефективності систем гарячого водопостачання за рахунок використання електричного теплоакumuлюючого перетворювача, який споживає позапикову електроенергію*

*Ключові слова: електричний теплоакumuлюючий перетворювач, системи гарячого водопостачання*

*В статті поставлена задача підвищення енергоефективності систем гарячого водоснабження за счёт использования електрического теплоакumuлюющего преобразователя, потребляющего внепиковую электроэнергию*

*Ключевые слова: электрический теплоакumuлирующий преобразователь, системы горячего водоснабжения*

*The problem of improving energy efficiency of hot water systems due to electric thermal storage converter consuming off-peak electricity is stated in this article*

*Key words: electric thermal storage converter, hot water supply system*

## РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

**С. А. Левченко**

Кандидат технічних наук, доцент\*

Контактний тел.: (061) 223-84-70

E-mail: Levchenko\_S@rambler.ru

**Н. А. Баташова**

Кандидат технічних наук, доцент\*

Контактний тел.: (061) 223-84-70

**В. Л. Коваленко**

Старший викладач

\*Кафедра електротехніки та енергетичного менеджменту

Запорізька державна інженерна академія  
пр. Леніна, 226, м. Запоріжжя, 69006

Контактний тел.: (061) 223-83-71, 063-240-50-05,  
099-621-96-38

E-mail: telkom82@mail.ru

Предлагаемый электрический теплоакumuлирующий преобразователь (ЭТАП) может быть с успехом использован для автономных источников горячего водоснабжения (мини-котельные, системы солнечного теплоснабжения и др.).

Конструктивно он представляет емкость, заполненную теплоакumuлирующим веществом с высокой удельной теплоемкостью и низкой теплопроводностью. Внутри бака осесимметрично расположены три электрода (по числу фаз) рис.1. ЭТАП работает в симметричном синусоидальном режиме.

Предлагается что ЭТАП будет использовать электроэнергию по внепиковому тарифу, что дает существенную экономию в получении тепловой энергии.

Преимущество ЭТАПа заключается в том, что можно обойтись без бака – аккумулятора, а тепловую энергию накапливать в промежуточном теплоносителе за счет потребления из сети электрической энергии во внепиковое время по соответствующему минимально-

му тарифу. При нехватке тепловой энергии ее дополнительное количество можно брать от электрического теплоакumuлирующего преобразователя.

Очевидно, что для обеспечения максимальной энергоэффективности предлагаемого преобразователя необходимо решить оптимизационную задачу выбора его конструктивных параметров и вида используемого теплоносителя, обеспечивающих наилучшие показатели по накоплению энергии (объемному распределению мощности), динамике накопления и последующей отдаче тепла в систему. При этом ввиду сложного воздействия многих факторов на режимы работы такого преобразователя, при определении его конструктивных параметров можно лишь приближаться к их оптимальным значениям.

Разнообразие и сложность геометрических форм и размеров современного электротехнологического оборудования, все более жесткие требования, предъявляемые к точности их расчета, с одной стороны,

указывают на ограниченную область применения аналитических методов для такого расчета, а, с другой стороны, подчеркивают актуальность разработки универсальных численных алгоритмов расчета, в данном случае - электромагнитных полей, ориентированных на применение вычислительных технологий. Располагая подобными алгоритмами, позволяющими варьировать геометрическими параметрами, свойствами материалов и другими характеристиками, можно заменить длительный эксперимент быстрым расчетом на ЭВМ различных вариантов и выбором оптимального из них. При этом создаются предпосылки автоматизации процесса проектирования таких теплоаккумулирующих преобразователей.

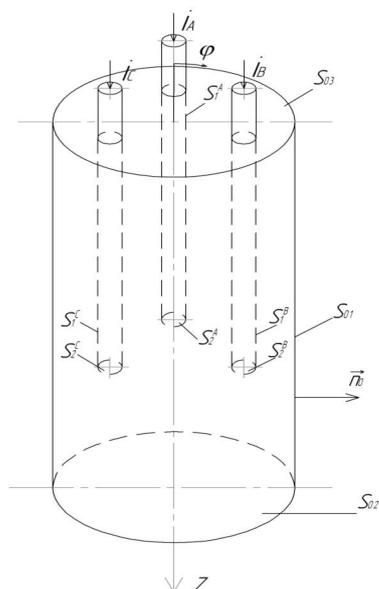


Рис. 1. Расчетная схема математической модели электрического теплоаккумулирующего преобразователя: S – площадь поверхности, 1 – боковая, 2 – нижняя, 3 – верхняя, А,В,С – фазы, 0 - бак

С этой целью предлагается алгоритм формирования трехмерной математической модели, предназначенной для расчета распределения активной мощности в баке электрического термоаккумулирующего преобразователя в виде системы интегральных уравнений по методу вторичных источников. Решающее преимущество метода вторичных источников перед остальными состоит в возможности построения универсальных и эффективных численных алгоритмов расчета полей, ориентированных на применение ЭВМ и пригодных для неоднородных сред и сложных форм границ раздела сред.

Метод вторичных источников предполагает выполнять расчет магнитных и электрических полей путем введения дополнительных вторичных источников в решаемую систему интегральных уравнений. Известно, что возможность замены влияния неоднородной среды такими источниками, вводимыми в однородную среду, является фундаментальным свойством электромагнитного поля [1]. Это свойство позволяет привести систему уравнений Максвелла, описывающую поле в неоднородной среде, к системе, описывающей поле

в однородной среде, вводя всюду, где характеристики среды меняются, вторичные источники.

Очевидно, что распределение вторичных источников не может быть произвольным, а должно удовлетворять соответствующему интегральному уравнению. Решив его, можно найти объемное распределение вторичных источников и свести задачу к известной методике расчета поля в однородной среде по известному распределению первичных и вторичных зарядов. Таким образом, решение задачи расчета поля в неоднородной среде складывается из двух этапов: 1) составление системы интегральных уравнений и нахождение из нее распределения неизвестных вторичных источников; 2) расчета эквивалентного поля в однородной среде.

Расчет электромагнитных процессов методом вторичных источников может быть сведен к решению интегральных уравнений Фредгольма II рода. Свойства этих уравнений известны и их численное решение принципиальных трудностей не представляет. Процесс их решения состоит в многократном вычислении объемных и поверхностных интегралов. Чтобы обеспечить необходимую точность вычисления интегралов, их поверхности и объемы разбиваются на множество малых элементов. Для повышения точности решения интегральных уравнений на ЭВМ в них вводится как можно больше добавочной информации об особенностях задачи и об интегральных свойствах искомого решения.

Согласно методу вторичных источников, распределение плотности  $\sigma$  вторичных зарядов удовлетворяет некоторой системе интегральных уравнений. Поверхностная плотность заряда  $\sigma(Q)$  в точке Q, расположенной на границе раздела областей однородной проводимости, определяется по формуле:

$$\sigma(Q) = 2\gamma_0 \lambda_Q \vec{n}_Q \vec{E}(Q), \tag{1}$$

где  $\gamma_0$  - удельная проводимость какой-либо однородной среды;  $\vec{n}_Q$  - вектор единичной нормали к границе раздела в точке Q;  $\vec{E}(Q)$  - напряженность в точке

Q, созданная всеми зарядами, распределенными на границах областей, исключая заряд в точке Q. Здесь параметр  $\lambda_Q$  зависит от проводимости граничащих областей:

$$\lambda_Q = \frac{\gamma^i - \gamma^e}{\gamma^i + \gamma^e}, \tag{2}$$

где  $\gamma^i$  - относительная проводимость области, из которой направлена нормаль к границе;  $\gamma^e$  - относительная проводимость области, в которую направлена нормаль к границе.  $\lambda_Q = -1 \div 1$

Напряженность поля выражается через распределение плотности заряда:

$$\vec{E}(Q) = -\frac{1}{4\pi\gamma_0} \int_S \sigma(M) \frac{\vec{r}_{QM}}{r_{QM}^3} dS_M, \tag{3}$$

где  $r_{QM}$  - расстояние между точкой Q (фиксированной) и M, в которой определяется напряженность, и

точкой  $M$  (переменной), в которой находится заряд  $\sigma(M)dS_M$ ;  $r_{QM}$  - вектор расстояния между точками  $Q$  и

$M$ , направленный из фиксированной точки  $Q$  в переменную точку  $M$ . Интегрирование производится по всем границам областей, где распределены с плотностью  $\sigma$  заряды - вторичные источники;  $S=S_0+S_A+S_B+S_C$  - поверхности проводящего тела (фазы и бак).

Подставляя значение  $\vec{E}(Q)$  по формуле (3) в формулу (1), получаем линейное однородное интегральное уравнение Фредгольма II рода относительно искомой плотности  $\sigma$  заряда по границе с параметром  $\lambda$ :

$$\sigma(Q) + \lambda \int_S \sigma(M)K(Q,M)dS_M = 0, \quad (4)$$

где

$$K(Q,M) = \frac{r_{QM}^{-1} - r_{QM}^{-3}}{2\pi r_{QM}^3} \quad (5)$$

- ядро интегрального уравнения.

Зная значения составляющих напряженности электрического поля, определяем мгновенную активную мощность, выделяющуюся в единичном объеме  $V_q$  бака аккумулятора:

$$p_q = \gamma E^2(q) = \gamma [E_p^2(q) + E_\phi^2(q) + E_z^2(q)] \left(-\frac{1}{4\pi\gamma_0}\right)^2 V_q. \quad (6)$$

Электрический теплоаккумулирующий преобразователь имеет высоту  $H_0$  и радиус  $R_0$  (рис.2).

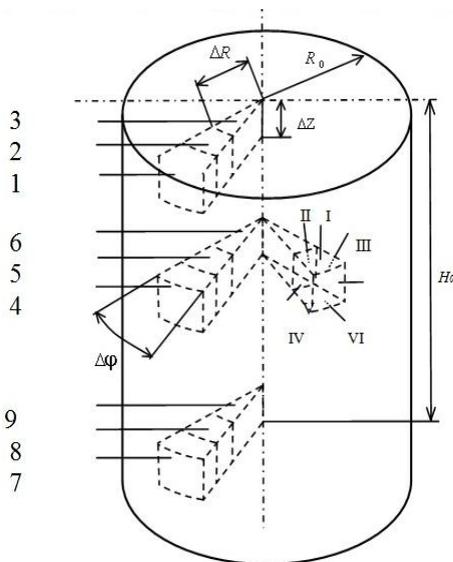


Рис. 2. Типы элементарных объемов

Разобьем цилиндр на ряд элементарных геометрических форм, в пределах которых закон изменения температуры будем считать линейным. В качестве элементарной геометрической формы примем сектор со сторонами  $\Delta R$ ,  $\Delta z$  и углом  $\Delta \phi$ . Расчетные точки расположим в геометрическом центре каждого элементарного сектора. Введем следующие обозначения:  $N_\phi$  - число разбиений цилиндра по  $\phi$ ;  $N_z$  - число разбиений

цилиндра по  $z$ ;  $k$  - номер элементарного объема по оси  $R$ . В зависимости от места расположения элементарных объемов можно выделить их 9 типов с гранями I, II, III, IV, V, VI.

Для того, чтобы объем элементарного сектора  $\Delta V$ , содержащий расчетную точку, оставался неизменным зададимся его значением и в зависимости от этого определим каждое изменение  $\Delta R_k$  по оси  $R$ :

$$\Delta R_k = \sqrt{\frac{\Delta V N_\phi}{\pi \Delta z}} (\sqrt{k+1} - \sqrt{k}), \quad (7)$$

где  $\Delta z = H_0/N_z$ .

Общий вид уравнения теплового баланса для рассматриваемого элементарного объема:

$$Q_I + Q_{II} + Q_{III} + Q_{IV} + Q_V + Q_{VI} + Q_W = \Delta J, \quad (8)$$

или

$$\sum_{i=1}^n Q_{ij} + Q_{Wj} = \Delta J_j, \quad (9)$$

где  $Q_I, Q_{II}, Q_{III}, Q_{IV}, Q_V, Q_{VI}$  - количество теплоты, вошедшее, либо вышедшее из элементарного объема за время  $\Delta t$  через соответствующие индексам грани;  $Q_{Wj}$  - количество теплоты, выделившееся за время  $\Delta t$  внутри элементарного объема;  $\Delta J_j$  - изменение теплоемкости последнего. Здесь индекс  $i$  - номер грани элементарного объема;  $j$  - номер элементарного объема.

С учетом введенных обозначений и после соответствующих преобразований представим (9) в виде:

$$t_{R,\phi,z}^{\tau+\Delta\tau} = t_{R,\phi,z}^\tau + \frac{1}{c_{vN}\rho \cdot \Delta V} \left( \sum_{i=1}^n Q_{ij} + Q_{Wj} \right). \quad (10)$$

Последнее уравнение позволяет рассчитать температуру в центре любого элементарного объема в момент времени  $\tau + \Delta \tau$ . В результате, зная расход теплоносителя, используемого для теплосъема, и его температуру перед преобразователем можно определить температуру на выходе ЭТАПа в любой момент времени  $\tau$ :

$$t_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЭТАП}} = t_{\text{ВХ}}^{\text{ЭТАП}} + \frac{\sum_{j=1}^m Q_{j\tau} - Q_{\text{Т.П.}\tau}}{G_{\text{Т.Н.}} \cdot \Delta\tau} \quad (11)$$

где  $t_{\text{ВХ}}^{\text{ЭТАП}}$  - температура перед ЭТАПом, К;  $G_{\text{Т.Н.}}$  -

расход теплоносителя, м<sup>3</sup>/с;  $C_{\text{Т.Н.}}$  - его теплоемкость,

Дж/(м<sup>3</sup>К);  $m$  - количество элементарных объемов, омываемых теплоносителем,  $Q_j$  - теплосодержание  $j$ -го элементарного объема, Дж;  $Q_{\text{Т.П.}\tau}$  - потери тепла, связанные с типом изоляции на месте установки ЭТАПа, Вт.

---

Литература

1. Тозони, О.В. Метод вторичных источников в электротехнике / О.В. Тозони. – М. : Энергия, 1975. – 295 с.
2. Математическое моделирование электрических полей печей рудной электротермии : учеб, пособие / С.А. Ольдзиевский, В.А. Кравченко, В.И. Нежурин, И.А. Борисенко. – М. : Металлургия, 1990. – 113 с.
3. Качан, Ю.Г. Применение электрического теплоаккумулирующего преобразователя для повышения эффективности систем горячего водоснабжения / Ю.Г. Качан, С.А. Левченко, Н.А. Кононенко. // Збірник наукових праць Міжнародної науково-технічної конференції “Енергоефективність’2005” (Додаток до журналу “Холодильна техніка і технологія”). – 2005. – С. 90 – 93.
4. Исаченко, В.П. Теплопередача : учеб, пособие / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416с.
5. Жукаускас, А.А. Теплопередача и тепловое моделирование / А.А. Жукаускас – М.: Изд-во АН СССР, 1959. –212 с.