

## Инженерный расчет индукционных водонагревателей

*П.Л. Лекомцев, Е.В. Дресвянникова, А.С. Корепанов, А.С. Соловьев*

*ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, г. Ижевск*

**Аннотация:** Рассмотрены перспективы использования индукционного электронагрева в сельском хозяйстве. Получена упрощенная методика расчета цилиндрического индукционного водонагревателя с внешним магнитопроводом.

**Ключевые слова:** электронагрев, индукционный нагрев, индуктор, магнитопровод, магнитная индукция, расчетный ток индуктора.

Сельское хозяйство является одним из крупнейших потребителей тепловой энергии. При этом отдельные потребители имеют низкую плотность тепловой энергии и рассредоточены на большой территории. В связи с этим особую актуальность приобретают индивидуальные энергосберегающие системы отопления. [1,2].

Использование в качестве источника тепловой энергии углеводородного топлива не всегда оправдано. Такие системы отопления неэффективны ввиду высоких транспортных расходов на доставку и хранение топлива, низкой автоматизации технологических процессов и невысокого коэффициента полезного действия.

Наиболее перспективными в настоящее время являются электрические нагреватели, использующие прямое преобразование электрической энергии в тепловую. Использование электронагрева позволяет сократить потери теплоты на 20...25% за счет автоматизации нагревательных установок, повысить технический уровень производства и производительность труда, повысить надежность системы теплоснабжения.

В настоящее время на рынке представлено широкое разнообразие электрических нагревателей разных типов и видов. [2,3]

Из электрических нагревателей наибольшую эффективность показали индукционные нагреватели [1,4,5]. Суть индукционного нагрева состоит в наведении вихревых токов в нагреваемом теле с последующим выделением Джоулевой теплоты. Эффект нагрева возрастает с ростом напряженности поля и

---

зависит от свойств материала и геометрической конфигурации нагревательной установки. Индукционный нагрев является прямым и бесконтактным, позволяет достигать высоких температур, достаточных для нагрева жидких и воздушных сред.

Индукционные нагреватели имеют развитую поверхность теплообмена, с перепадом температуры между теплоносителем и поверхностями нагрева не более 20-30 °С. Это многократно замедляет процесс отложения накипи и увеличивает срок службы нагревателей.

Разработано большое количество методик расчета индукционных нагревателей [4,6,7,8,9]. Однако использование в расчетах громоздких математических выражений, комплексных величин, «кривых связи» препятствуют широкому распространению методик расчета в инженерной практике.

Предложена упрощенная методика расчета индукционного водонагревателя.

В основу расчета положена физическая модель индукционного водонагревателя в виде однофазного трансформатора с одновитковой короткозамкнутой вторичной обмоткой, работающей в режиме короткого замыкания. Индуктором нагревателя служит первичная обмотка, а вторичной обмоткой служит замкнутый контур цилиндрического сосуда [10].

Расчетная полезная мощность равна

$$P_{пол} = \alpha_{жс} F_{жс} \Delta t_{ун}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{жс}$  – коэффициент теплоотдачи в цепи «сосуд-жидкость», Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $F_{жс}$  – площадь внутренней поверхности сосуда, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{ун}$  – условно-нормативный перепад температур «стенка-вода», °С. Для единичной поверхности  $F_e = 1$  м<sup>2</sup>  $\Delta t_{ун} = 1000/\alpha_{жс} F_e$ .

Потери мощности с наружной поверхности нагревателя

$$\Delta P_q = \alpha_n F_n \Delta t_n, \quad (2)$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности нагревателя, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $F_n$  – площадь наружной поверхности нагревателя, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_n$  – максимальный перепад температур «индуктор-воздух», °С.

Максимальное число витков индуктора

$$\omega_{\max} = \frac{K_p U_n}{4,44 f B_p S_c}, \quad (3)$$

где  $K_p = 0,5$  – коэффициент преобразования автотрансформатора;  $U_n$  – номинальное сетевое напряжение, В;  $f$  – частота сетевого питания, Гц;  $B_p$  – расчетная магнитная индукция, Тл;  $S_c$  – площадь сечения сосуда, м<sup>2</sup>.

Магнитная индукция равна

$$B_p = \mu_0 \mu H_p, \quad (4)$$

где  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $\mu \approx 0,8 \sqrt{(\mu_c \cdot \mu_n)}$  – средняя магнитная проницаемость;  $\mu_c$  – магнитная проницаемость материала сосуда;  $\mu_n$  – магнитная проницаемость внешнего магнитопровода;  $H_p = 1,3 \cdot H_{\min}$  – расчетная напряженность магнитного поля, А/м;  $H_{\min}$  – минимальная напряженность магнитного поля для труб и конструкционных сталей, А/м.

Площадь поперечного сечения сосуда

$$S_c = \pi D_{cp} \Delta d, \quad (5)$$

где  $D_{cp} = (D_1 + d)/2$  – средний диаметр сосуда, м;  $D$  и  $d$  – соответственно наружный и внутренний диаметр сосуда, м;  $\Delta d$  – толщина стенки сосуда, м.

Расчетное напряжение питания индуктора

$$U_p = 4,44 \omega_p f B_p S_c, \quad (6)$$

где  $\omega_p = 0,75 \omega_{\max}$  – расчетное число витков индуктора.

Расчетный ток индуктора по допустимой напряженности магнитного поля

$$I_p = H_p l / \omega_p, \quad (7)$$

где  $l = 2h$  – длина магнитной цепи, м;  $h$  – высота нагревателя, м.

Сечение обмоточного провода, мм<sup>2</sup>

$$S_n = I_p / j_{\max}, \quad (8)$$

где  $j_{\max}$  – максимальная допустимая плотность тока в проводнике, А/мм<sup>2</sup>;

Сечение обмоточного провода выбирают из ближайшего стандартного ряда.

Вторичная активная мощность нагревателя

$$P_2 = I_{2p}^2 r_2, \quad (9)$$

где  $I_{2p} = I_p \omega_p$  – вторичный ток (ток в теле сосуда), А;  $r_2$  – активное сопротивление вторичной цепи (сосуда), Ом.

$$r_2 = \frac{\rho_c \pi (D - \Delta/2)}{\Delta \cdot h}, \quad (10)$$

где  $\rho_c$  – удельное электрическое сопротивление материала сосуда, Ом·м;  $\Delta$  – глубина проникновения вторичного тока, индуцированного в стенке сосуда, м.

Активная мощность, выделяемая в обмотке индуктора

$$P_1 = I_p^2 r_1, \quad (11)$$

где  $r_1 = \rho_n \pi (D + d_n / 2) \omega_p / S_n$  – активное сопротивление обмотки индуктора, Ом.

Коэффициент полезного действия индукционного водонагревателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_1}. \quad (12)$$

Таким образом, предложена упрощенная инженерная методика расчета индукционного водонагревателя.

### Литература

1. Баранов Л. А. Новые электронагревательные устройства для сельскохозяйственного производства. Челябинск, 1997, 68 с.
2. Петренко В.Н., Мокрова Н.В. Разработка системы горячего водоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии // Инженерный вестник Дона. 2013. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1617/.

3. Рудобашта С. П., Оболенский Н. В., Мокеев А. А. Подогреватели воды для сельскохозяйственных объектов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2003, № 9, с. 16-17.
4. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. – М.: Энергоатомиздат, 1988, 200 с.
5. Кувалдин А.Б. Низкотемпературный индукционный нагрев. – М.Энергия, 1976, 112 с.
6. Лекомцев П.Л., Соловьев А.С., Корепанов А.С. Расчет цилиндрического индукционного водонагревателя без магнитопровода // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – №4 (41). – С. 34-37.
7. Лабынцев А.В., Лабынцев В.А. Приближенный расчет погонной индуктивности витой пары // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1438/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1438/).
8. Oliver Bodart, Anne-Valerie Boureau, Rachid Touzani. Numeical investigation of optimal control of induction heating processes // Applied Mathematical Modelling, 25 (2001), pp. 697-712.
9. Hai Du, Junyuan Li, and Yanbin Qu. Mathematical Modeling of Eddy-Current Loss for a New Induction Heating Device // Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering. Volume 2014, Article ID 923745, 7 pages.
10. Лекомцев П.Л. Абашев Д.Т., Евстифеев Я.Г. Индукционные нагреватели // Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 35-летию факультета электрификации и автоматизации с.-х. «Инновационные электротехнологии и электрооборудование предприятиям АПК»: – Ижевск, ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2012. – С. 6-8.
11. Абашев Д.Т., Лекомцев П.Л. Индукционный электронагрев в сельском хозяйстве // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной

академии. – 2011. – № 4 (29). – С. 57-58

### References

1. Baranov L.A. Novye elektronagrevatel'nye ustroystva dlya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva [New electroheating devices for agricultural production]. Chelyabinsk, 1997, 68 p.
2. Petrenko V.N., Mokrova N.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1617/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1617/).
3. Rudobashta S.P., Obolenskiy N.V., Mokeev A.A. Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva. 2003, № 9, pp. 16-17.
4. Kuvaldin A.B. Induktsionnyy nagrev ferromagnitnoy stali [Induction heating of ferromagnetic steel]. M.: Energoatomizdat, 1988, 200 p.
5. Kuvaldin A.B. Nizkotemperaturnyy induktsionnyy nagrev [Low-temperature induction heating]. M.: Energiya, 1976, 112 p.
6. Lekomtsev P.L., Solov'ev A.S., Korepanov A.S. Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii. 2014. №4 (41). pp. 34-37.
7. Labyntsev A.V., Labyntsev V.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1438/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1438/).
8. Oliver Bodart, Anne-Valerie Boureau, Rachid Touzani. Numeical investigation of optimal control of induction heating processes. Applied Mathematical Modelling, 25 (2001), pp.697-712.
9. Hai Du, Junyuan Li, and Yanbin Qu. Mathematical Modeling of Eddy-Current Loss for a New Induction Heating Device. Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering. Volume 2014, Article ID 923745, 7 pages.
10. Lekomtsev P.L. Abashev D.T., Evstifeev Ya.G. Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posv. 35-letiyu fakul'teta elektrifikatsii i avtomatizatsii s.-kh. «Innovatsionnye elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatiyam APK» [The All-Russian scientific and practical conference devoted to the 35 anniversary of faculty of electrification and automation of agriculture. "Innovative



electrotechnologies and electric equipment to the enterprises of agrarian and industrial complex"]]: Izhevsk, FGBOU VPO Izhevskaya GSKhA, 2012. pp. 6-8.

11. Abashev D.T., Lekomtsev P.L. Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii. 2011. № 4 (29). pp. 57-58.