

УДК 621.537.85

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ИНДУКТИВНО-КОНДУКТИВНОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

А.И. Елшин¹, В.В. Кожухов², П.А. Елшин³

¹Арктический государственный агротехнологический университет

²Новосибирский государственный технический университет

³ООО «Сибполимерстрой»

Для уменьшения производственных затрат при проектировании и создании индуктивно-кондуктивного нагревателя (ИКН) необходимо как можно точнее провести предварительный расчет. Это возможно при использовании наиболее приближенной электрической схемы замещения ИКН к реальному объекту. Появляется возможность оценить работу ИКН в различных эксплуатационных условиях, в том числе аварийных, с помощью более простого моделирования. Индуктивно-кондуктивный нагреватель трансформаторного типа представляет из себя трехстержневой Ш-образный магнитопровод с первичными обмотками, которые охвачены теплообменником (ТО) из трех концентрических систем электропроводящих цилиндров с внутренним щелевым каналом для теплоносителя. Энергия от питающей сети с помощью первичной обмотки передается в теплообменник через воздушный промежуток **индуктивным** способом. Вторичная цепь электромагнитного устройства является теплообменником, в котором электрическая энергия преобразуется в тепловую. Тепловой поток от разогретых цилиндрических стенок ТО **кондуктивным** путем нагревает циркулирующий в системе теплоноситель до необходимой температуры. Большая площадь поверхности ТО позволяет избежать его перегрева по отношению к теплоносителю, что положительно сказывается при эксплуатации ИКН в системах отопления и горячего водоснабжения, значительно уменьшая отложения примесей воды на стенках ТО. Увеличивается срок службы устройства до 100 тыс. часов и более. В работе проведено синтезирование элементов схемы замещения ИКН и представлены результаты расчета характеристик стационарного режима ряда изделий. Схема замещения позволяет моделировать электромагнитные процессы в устройствах различной мощности, напряжения и промышленных частот в диапазоне 50...1000 Гц. В случае изменения конфигурации камеры нагрева (вторичной цепи) производится корректировка параметров элементов схемы замещения без изменения общего алгоритма построения. Для новых изделий индуктивно-кондуктивного нагрева отсутствуют какие-либо библиографические данные для расчета элементов схемы замещения, особенно в части формирования схемы замещения вторичной цепи, определяемой конструктивным исполнением камеры нагрева. Для восполнения этого пробела авторами проделана настоящая работа.

Ключевые слова: индуктивно-кондуктивный нагреватель, схема замещения, алгоритм расчета.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-7-16

Введение

Электрическая схема замещения реального индуктивно-кондуктивного нагревателя (ИКН) позволяет провести исследование характеристик устройства любой мощности без производственных затрат на создание опытного экземпляра. Упрощается моделирование различных эксплуатационных стационарных режимов работы изделия и появляется возможность прогнозирования условий функционирования ИКН в различных аварийных ситуациях.

В целом, построение схемы замещения ИКН осуществлено на базе общеизвестных существующих методик, приведенных в [1–6] с введением дополнитель-

ных определений [7], присущих данному типу устройств, что позволяет провести расчет и моделирование индуктивно-кондуктивного нагревателя с оптимальными массостойкими показателями.

1. Основы построения схемы замещения

Общий вид схемы замещения фазы индуктивно-кондуктивного нагревателя представлен на рис. 1.

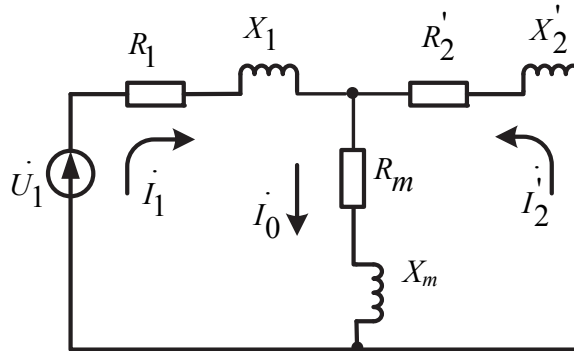


Рис. 1 – Схема замещения фазы индуктивно-кондуктивного нагревателя

Fig. 1 – Phase replacement diagram of an inductive-conductive heater

По известным основным размерам ИКН и обмоточным данным определяются:

- активное сопротивление первичной обмотки R_1 ;
- активное сопротивление теплообменника R_2 ;
- индуктивное сопротивление рассеяния обмотки X_1 и теплообменника X_2 .

Основные и добавочные потери в стали P_m позволят отыскать активную составляющую сопротивления поперечной ветви схемы замещения R_m . Реактивное сопротивление поперечной ветви X_m рассчитывается на основании падения магнитного напряжения, обусловленного величиной намагничивающей силы.

Трехфазный индуктивно-кондуктивный нагреватель (рис. 2) содержит трех-стержневой Ш-образный магнитопровод 1 с первичными обмотками 2, на которые помещен теплообменник 3 (ТО) из трех концентрических систем электропроводящих цилиндров, образующих щелевой канал для теплоносителя, и объединенных в одну систему через присоединительные патрубки 4.

Теплообменник отделен от первичной обмотки воздушным промежутком, через который **индуктивным** способом передается энергия от питающей сети. ТО является вторичной цепью электромагнитного устройства, в котором происходит преобразование электроэнергии в теплоту. Тепловой поток от цилиндрических стенок ТО **кондуктивным** путем нагревает циркулирующий в системе теплоноситель до необходимой температуры. Благодаря развитой теплоотдающей поверхности ТО перегрев стенок по отношению к теплоносителю незначителен, что благоприятно сказывается на функционировании устройства в системах отопления и горячего водоснабжения без отложений примесей воды на стенках ТО. Это увеличивает срок службы устройства до 100 тыс. часов и более.

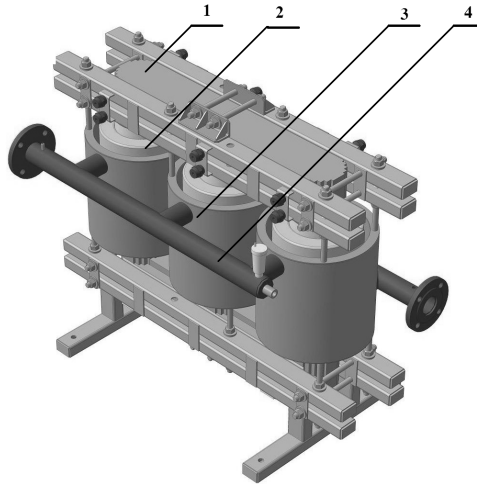


Рис. 2 – Общий вид трехфазного индуктивно-кондуктивного нагревателя

Fig. 2 – General view of a three-phase inductive-conductive heater

Кроме того, двойная изоляция напряжения сети и низкий электрический потенциал прикосновения к ТО (не более 2 В) делает устройство электробезопасным на уровне второго класса, расширяя области его применения.

Исходными данными к синтезу параметров схемы замещения фазы ИКН являются следующие.

Мощность на фазу P , кВт.

Напряжение сети фазное U , В.

Коэффициент ЭДС k_e .

Частота сети f , Гц.

Индукция магнитного потока стержня магнитопровода B_m , Т.

Удельное электрическое сопротивление обмоточного провода ρ_o , Ом · м.

Удельное электрическое сопротивление ТО ρ_t , Ом · м.

Диаметр стержня магнитопровода d , м.

Масса электротехнической стали на фазу G_{fe} , кг.

Зазор между магнитопроводом и обмоткой ε , м.

Внутренний диаметр обмотки D , м.

Толщина обмотки b , м.

Сечение провода обмотки $s_{пр}$, м².

Внешний диаметр обмотки D_1 , м.

Зазор между обмоткой и ТО δ , м.

Внутренний диаметр теплообменника D_2 , м.

Толщина стенки ТО a , м.

Внешний диаметр первого цилиндра теплообменника D_3 , м.

Ширина щелевого канала для теплоносителя c , м.

Внутренний диаметр второго цилиндра теплообменника D_4 , м.

Внешний диаметр второго цилиндра теплообменника D_5 , м.

Высота теплообменника h , м.

Число витков фазы W .

2. Расчет параметров схемы замещения

Активное сопротивление обмотки

$$R_1 = \rho_0 W \pi \frac{D + D_1}{2s_{\text{пр}}}.$$

Активное сопротивление внутреннего цилиндра теплообменника

$$R_{21} = \rho_t \pi \frac{D_2 + a/2}{ah}.$$

Активное сопротивление торцевых крышек теплообменника

$$R_{22} = \rho_t \pi \frac{1}{a \ln \left(\frac{D_4}{D_3} \right)}.$$

Активное сопротивление внешнего цилиндра теплообменника

$$R_{23} = \rho_t \pi \frac{D_4 + a/2}{ah}.$$

Активное сопротивление теплообменника

$$R_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}} + \frac{1}{R_{23}}}.$$

Приведенное активное сопротивление теплообменника

$$R'_2 = R_2 W^2.$$

Индуктивные сопротивления короткого замыкания.

Параметры расчетных зон магнитного поля рассеяния:

$$x_1 = b \left(\frac{D}{3} + \frac{b}{4} \right),$$

$$x_2 = \delta \left(D_1 + \frac{\delta}{2} \right),$$

$$x_3 = a \left(7 \frac{D_2}{12} + 11 \frac{a}{48} \right),$$

$$x_4 = \frac{c}{4} \left(D_3 + \frac{c}{2} \right),$$

$$x_5 = b \left(\frac{D_4}{3} + \frac{a}{4} \right).$$

Соотношение расчетных зон первичной и вторичной цепей

$$k = \frac{x_1 + \frac{x_2}{2}}{\frac{x_2}{2} + x_3 + x_4 + x_5}.$$

Ширина зоны потоков рассеяния

$$\tau = 2a + b + c + \delta.$$

Коэффициент соотношения

$$u = \frac{h}{\tau}.$$

Коэффициент Роговского

$$\rho_1 = 1 - \frac{1}{\pi u} (1 - e^{-\pi u}).$$

Приведенная длина силовых линий потоков рассеяния

$$L = \frac{h}{\rho_1}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки

$$X_1 = \frac{2\pi^2 f \mu_0 W^2}{L} \left(x_1 + \frac{x_2}{2} \right),$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость вакуума.

Индуктивное сопротивление рассеяния теплообменника

$$X_2 = \frac{2\pi^2 f \mu_0}{L} \left(\frac{x_2}{2} + x_3 + x_4 + x_5 \right).$$

Приведенное индуктивное сопротивление теплообменника

$$X'_2 = X_2 W^2.$$

Сопротивления холостого хода.

Удельные потери в электротехнической стали магнитопровода

$$p_c = p_{co} \left(\frac{B_m}{1,5} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right),$$

где p_{co} – удельные потери в стали при индукции 1,5 Т.

Потери энергии в магнитопроводе

$$P_c = p_c G_{fe}.$$

Активное сопротивление схемы замещения

$$R_m = \frac{(U k_e)^2}{P_c}.$$

Средняя магнитная проницаемость стали магнитопровода

$$\mu_r = \frac{B_m}{H},$$

где H – напряженность магнитного поля в магнитопроводе, определяемое по основной кривой намагничивания стали.

Магнитное сопротивление магнитопровода

$$R_c = \frac{L_c}{\mu_r \cdot S_c},$$

где L_c , S_c – длина и площадь сечения магнитопровода.

Магнитное сопротивление воздушных зазоров магнитопровода

$$R_\delta = \frac{L_\delta}{\mu_0 S_\delta},$$

где L_δ , S_δ – длина и площадь сечения воздушных зазоров.

Индуктивное сопротивление намагничивающей цепи

$$X_m = \omega W^2 \frac{1}{R_c + R_\delta}.$$

Здесь $\omega = 2\pi f$ – круговая частота.

3. Апробация работоспособности схемы замещения ИКН

Проведем расчет характеристик стационарного режима по схеме замещения ИКН на фазу.

Полное сопротивление схемы замещения в комплексно-символической форме

$$Z_1 = R_1 + j \cdot X_1 + \frac{1}{\frac{1}{R'_2 + j \cdot X'_2} + \frac{1}{R_m + j \cdot X_m}}.$$

Входной ток

$$I_1 = \frac{U}{Z_1}.$$

Коэффициент мощности индуктивно-кондуктивного нагревателя

$$\cos \varphi = \frac{\operatorname{Re}(I_1)}{|I_1|}.$$

Полная мощность, потребляемая нагревателем,

$$S_1 = \dot{U} \bar{I}_1.$$

Активная мощность, потребляемая нагревателем,

$$P_1 = \operatorname{Re}(S_1).$$

Приведенная ЭДС вторичной цепи схемы замещения

$$E'_2 = U - I_1(R_1 + jX_1).$$

Коэффициент ЭДС

$$k_e = \frac{E'_2}{U}.$$

Приведенный ток вторичной цепи

$$I'_2 = \frac{E'_2}{Z'_2}.$$

Полный ток вторичной цепи

$$i_2 = |I'_2| \cdot W.$$

Активная мощность ИКН

$$P_2 = \operatorname{Re}(E'_2 \cdot \bar{I}'_2).$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

В таблице приведены параметры схемы замещения ряда типоразмеров трехфазных ИКН, полученных по изложенной выше методике расчета. Расчетные данные хорошо согласуются с результатами производственных испытаний типоразмеров индуктивно-кондуктивных нагревателей, представленных ниже.

Характеристики стационарного режима трехфазных ИКН

Characteristics of the stationary mode of three-phase inductive-conductive heater

| Мощность, кВт Параметр | 15 | 20 | 50 | 80 | 150 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Исходные величины | | | | | |
| Индукция в сердечнике B_m , Т | 1,4 | 1,45 | 1,5 | 1,55 | 1,6 |
| Диаметр внутренней обмотки D , мм | 72 | 77 | 95 | 102 | 115 |
| Высота обмотки h , мм | 300 | 340 | 425 | 520 | 630 |
| Толщина обмотки b , мм | 10,4 | 11,5 | 14,1 | 15,3 | 17,3 |
| Толщина стенки теплообменника a , мм | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,5 | 2,8 |
| Зазор δ , мм | 7 | 9 | 13 | 15 | 16 |
| Ширина кольцевого канала c , мм | 6 | 8 | 9 | 10 | 12 |
| Число витков W | 215 | 181 | 116 | 90 | 68 |
| Масса магнитопровода G_{fe} , кг | 40 | 50 | 95 | 140 | 210 |
| Параметры схемы замещения | | | | | |
| Активное сопротивление обмотки R_1 , Ом | 0,183 | 0,106 | 0,031 | 0,016 | 0,007 |
| Активное приведенное сопротивление теплообменника R'_2 , Ом | 10,4 | 6,789 | 2,717 | 1,74 | 0,978 |
| Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки X_1 , Ом | 0,113 | 0,089 | 0,051 | 0,03 | 0,018 |
| Индуктивное приведенное сопротивление рассеяния теплообменника X'_2 , Ом | 0,121 | 0,099 | 0,056 | 0,031 | 0,018 |
| Активное сопротивление намагничивающей ветви R_c , Ом | 2700 | 1950 | 960 | 540 | 380 |

Окончание таблицы / The End Table

| Мощность, кВт Параметр | 15 | 20 | 50 | 80 | 150 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Индуктивное сопротивление намагничивающей ветви X_m , Ом | 412 | 285 | 134 | 78 | 45 |
| Ток первичной обмотки I_1 , А | 20,9 | 32,0 | 80,2 | 125,7 | 223,8 |
| Ток теплообменника I_2 , А | 4470 | 5770 | 9275 | 11270 | 15170 |
| Потребляемая мощность P_1 , кВт | 15,8 | 21,1 | 52,9 | 82,8 | 153,0 |
| Электрический КПД | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| $\cos \varphi$ | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| Коэффициент ЭДС k_e | 0,982 | 0,984 | 0,988 | 0,99 | 0,992 |
| ЭДС витка e , В | 1,09 | 1,25 | 1,95 | 2,53 | 3,36 |

Выводы

Схема замещения, созданная по общеизвестным методикам с учетом специфических особенностей конструктивного построения индуктивно-кондуктивных нагревателей промышленной частоты, может быть использована для моделирования электромагнитных процессов в устройствах различной мощности, напряжения и промышленных частот в диапазоне 50...1000 Гц. При отличающейся конфигурации камеры нагрева (вторичной цепи) необходима корректировка параметров элементов схемы замещения без изменения общего алгоритма построения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
2. Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. – Л.: Энергия, 1974. – 504 с.
3. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1969. – 632 с.
4. Трансформаторы силовые общего назначения до 35 кВ включительно. Технический справочник. – М.: Стандартэлектро, 1993.
5. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. – М.: Энергия, 1968. – 456 с.
6. Туровский Я. Электромагнитные расчеты элементов электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
7. Елишин А.И. Конструкции и расчет трансформаторных устройств низкотемпературного нагрева для жизнеобеспечения человека: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 140 с.

**CALCULATION OF SUBSTITUTION SCHEME PARAMETERS
INDUCTIVE-CONDUCTIVE HEATER**

Elshin A.I.¹, Kozhukhov V.V.², Elshin P.A.³

¹Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Russia

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

³ООО "Sibpolimerstroy", Novosibirsk, Russia

To reduce production costs in the design and creation of an inductive-conductive heater (ICH), it is necessary to carry out a preliminary calculation as accurately as possible. This is possible when using the most approximate electrical circuit for replacing the ICH to a real object.

It becomes possible to assess the work of the ICH in various operating conditions, including emergency conditions, using simpler modeling. An inductive-conductive heater transformer-type is a three-rod W-shaped magnetic circuit with primary windings, which are covered by a heat exchanger (HE) of three concentric systems of electrically conductive cylinders with an internal slotted channel for the coolant. The energy from the mains supply is inductively transferred to the heat exchanger through the air gap by means of the primary winding. The secondary circuit of an electromagnetic device is a heat exchanger in which electrical energy is converted into heat. The heat flux from the heated cylindrical walls of the HE conductively heats the coolant circulating in the system to the required temperature. The large surface area of the HE allows you to avoid its overheating in relation to the coolant, which has a positive effect during the operation of the ICH in heating and hot water supply systems, significantly reducing the deposition of water impurities on the walls of the HE. The service life of the device is increased to 100 thousand hours or more. In the work, the synthesis of elements of the ICH equivalent circuit is carried out and the results of calculating the characteristics of the stationary mode of a number of products are presented. The equivalent circuit allows you to simulate electromagnetic processes in devices of different power, voltage and industrial frequencies in the range of 50...1000 Hz. If the configuration of the heating chamber (secondary circuit) is changed, the parameters of the elements of the equivalent circuit are adjusted without changing the general construction algorithm. For new products of inductive-conductive heating, there are no bibliographic data for calculating the elements of the equivalent circuit, especially regarding the formation of the replacement circuit of the secondary circuit, determined by the design of the heating chamber. To fill this gap, the authors have done this work.

Key words: inductive-conductive heater, equivalent circuit, calculation algorithm.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-7-16

REFERENCES

1. Leites L.V. *Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov* [Electromagnetic calculations of transformers and reactors]. Moscow, Energiya Publ., 1981. 392 p.
2. Dombrovskii V.V., Khutoretskii G.M. *Osnovy proektirovaniya elektricheskikh mashin peremennogo toka* [The basics of designing electric AC machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1974. 504 p.
3. Sergeev P.S., Vinogradov N.V., Goryainov F.A. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Designing electric machines]. 3rd. ed. Moscow, Energiya Publ., 1969. 632 p.
4. *Transformatory silovye obshchego naznacheniya do 35 kV vklyuchitel'no. Tekhnicheskii spravochnik* [Power transformers of general purpose up to 35 kV inclusive. Technical handbook]. Moscow, Standartelectro Publ., 1993.
5. Tikhomirov P.M. *Raschet transformatorov* [Transformers calculating]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 456 p.
6. Turovskii Ya. *Elektromagnitnye raschety elementov elektricheskikh mashin* [Electromagnetic calculations of elements of electric machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 200 p.
7. Elshin A.I. *Konstruktsii i raschet transformatornykh ustroystv nizkotemperaturnogo nagreva dlya zhizneobespecheniya cheloveka* [Designs and calculation of transformer low-temperature heating devices for human life support]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2000. 140 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Елшин Анатолий Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Энергообеспечение в АПК» ФГБОУ ВО Арктический ГИТУ. Опубликовано более 140 работ в области электромеханики и электротехнологии. (Адрес: 677007, Россия, г. Якутск, Сергеляхское шоссе, 3 км, д. 3. E-mail: elhin46@mail.ru).

Elshin Anatoly Ivanovich – Doctor of Sciences (Eng.), professor of the Department of Power Supply in the Agro-Industrial Complex of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Arctic GATU. More than 140 scientific papers have been published. (Address: Sergelyakhskoe highway, 3 km, building 3, 353907, Russia, Yakutsk. E-mail: elshin46@mail.ru).



Кожухов Вячеслав Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и электротехники НГТУ. Опубликовано более 30 работ в области силовой электроники и электротехнологии. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: kozhukhov@corp.nstu.ru).

Kozhukhov Vyacheslav Victorovich – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor of the Department of Electronics and Electrical Engineering, NSTU. More than 30 papers have been published. (Address: 20, Karl Marx Av., 630073, Russia, Novosibirsk. E-mail: kozhukhov@corp.nstu.ru).



Елишин Петр Анатольевич – инженер по производству ООО «Сибполимерстрой». Опубликовано 8 работ в области электротехнологии. (Адрес: 630096, Россия, г. Новосибирск, ул. Станционная, 38, к. 28а. E-mail: elshin@ngs.ru).

Elshin Petr Anatolievich – Production engineer at SibPolymerStroy LLC. 8 scientific papers have been published. (Address: St. Station, 38, k. 28a, Novosibirsk, Russia, 630096. E-mail: elshin@ngs.ru).

*Статья поступила 23 ноября 2020 г.
Received November 23, 2020*

To Reference:

Elshin A.I., Kozhukhov V.V., Elshin P.A. Raschet parametrov skhemy zarneshcheniya induktivno-konduktivnogo nagrevatelya [Calculation of substitution scheme parameters inductive-conductive heater]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 4 (49), pp. 7–16. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-7-16