

7. Kondratyev, S. I. A diagnostic system of an intelligent component based on Bayesian accurate inference networks / S. I. Kondratyev, A. I. Epikhin, S. O. Malakhov // Journal of Physics: Conference Series, Novosibirsk, 12–14 maya 2021 goda. – Novosibirsk, 2021. – P. 012022. – DOI 10.1088/1742-6596/2032/1/012022. – EDN VGBGQW.
8. Epihin, A. I. Analiz bezopasnosti bezekipazhnyh sudov na osnove struktury modeli riska s ispol'zovaniem seti bajesa / A. I. Epihin, E. V. Hekert, M. A. Modina // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2021. – № 2-4(52). – S. 38-46. – DOI 10.37220/MIT.2021.52.2.067. – EDN ODSQOM.
9. Epihin A.I., Hekert E.V., Karakaev A.B., Modina M.A. Osobennosti postroeniya prognosticheskoy nejro-fazzi seti // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 4-4 (50). S. 13-17.
10. Epihin A.I., Hekert E.V., Modina M.A. Principy nejroupravleniya i varianty arhitektury nejronnyh setej, primenitel'no k slozhnoj dinamicheskoy sisteme SEU-SUDNO // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 4-4 (50). S. 18-22.
11. Belov, A. A. Primenenie metoda izmereniya chasticnyh razryadov dlya opredeleniya sostoyaniya izoljatsii vysokovol'nyh vrashchayushchih mashin / A. A. Belov, V. V. SHkoda, E. G. Popova // Tekhnicheskie i tekhnologicheskie sistemy : Materialy dvenadcatoj Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, Krasnodar, 25–27 noyabrya 2021 goda. – Krasnodar: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu "Izdatel'skij Dom - YUG", 2021. – S. 11-21. – EDN ZRPPSF.
12. Varianty realizacii sistem upravleniya elektronnyimi diagnosticheskimi i informacionnymi kompleksami posredstvom mikrokontrollera STM32F100C8T6 / YA. M. Kashin, S. V. Kliment'ev, A. V. Pavrozin [i dr.] // Elektronnyj setевой politematicheskij zhurnal "Nauchnye trudy KubGTU". – 2022. – № 1. – S. 70-78. – EDN SVR-GUM
13. Syusyuka, E. N. Fizicheskie osnovy uprochneniya poverhnostej detalej sudovyh tekhnicheskikh sredstv naneseniem nanopokrytij / E. N. Syusyuka, B. P. Bashurov // Eksploatatsiya morskogo transporta. – 2017. – № 4(85). – S. 94-97. – EDN YRPIMH.

УДК: 621.365.5

DOI: 10.34046/aumsuomt105/13

## РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ НАЛИВНЫХ ГРУЗОВ

*Э.К. Аблязов, кандидат технических наук, доцент*

*К.А. Аблязов, кандидат технических наук, доцент*

*Е.М. Дорофеев, кандидат педагогических наук*

В статье рассматривается нагрев металлических поверхностей и токопроводящих жидкостей бегущим магнитным полем, который замыкаясь через немагнитный зазор по стенкам ферромагнитного материала и вне его, передает ему тепловую энергию за счет вихревых токов. В работе произведен обзор, анализ и предварительный расчет модульного индукционного линейного нагревателя. В конце статьи дано заключение.

**Ключевые слова:** индукционный нагреватель, тепловой эффект, выбор конструкции нагревателя, модульный нагреватель

## DEVELOPMENT OF A MODULAR INDUCTION HEATER FOR LIQUID CARGO

*E. K. Ablyazov, K. A. Ablyazov, E. M. Dorofeev*

The article discusses the heating of metal surfaces and conductive liquids by a traveling magnetic field, which, closing through a non-magnetic gap along the walls of a ferromagnetic material and outside it, transfers thermal energy to it due to eddy currents. The paper provides a review, analysis and preliminary calculation of a modular induction linear heater. A conclusion is given at the end of the article.

**Key words:** induction heater, thermal effect, choice of heater design, modular heater

Индукционный линейный нагреватель предназначен для обогрева трубопроводов или больших металлических вместилищ жидкостей или сыпучих материалов в них находящихся без непосредственного контакта с нагреваемой поверхностью через немагнитный зазор. Питание нагревателя осуществляется от сети трехфазного тока промышленной частоты.

Эксплуатация нагревателя предусматривается на прямолинейных и криволинейных, с большим радиусом закругления, участках трубопроводов или других металлических емкостей как в за-

крытых помещениях, так и вне их в тяжелых погодных условиях, при высокой влажности и низких температурах.

Нагрев металлических поверхностей и токопроводящих жидкостей, материалов, находящихся под ними, осуществляется, в отличие от существующих нагревателей, трехфазным линейным индуктором, бегущее магнитное поле которого замыкаясь через немагнитный зазор по стенкам ферромагнитного материала и вне его передает ему тепловую энергию за счет вихревых токов [1].

Тепловой эффект обеспечивается как поперечным магнитным полем, создаваемым отдельными полюсами трехфазного индуктора, так и за счет, бегущего магнитного поля перемещающегося вдоль нагреваемой поверхности.

Индуктор фактически представляет собой развернутый в линейный статор асинхронной явнополюсной или распределенной обмотки машины, роль заторможенного ротора которой выполняет ферромагнитный и токопроводящий материал. При такой системе нагрева (по аналогии с электрическими машинами) 80-85% активной мощности двигателя передается в заторможенный ротор, а 15-20% - теряется в обмотке статора [2].

Активная поверхность индуктора линейного нагревателя может повторять овальную форму нагреваемой поверхности, что несколько усложняет конструкцию и его целесообразно применять при малых градусах закругления. Например, такая конструкция может быть целесообразна на трубопроводах для нагрева жидкости. Возможен вариант расположения нескольких труб между двумя плоскими индукторами, что может существенно увеличить путь и время нахождения жидкости в зоне нагрева и повысит эффективность работы системы. Уже при диаметрах труб более 100 мм будет целесообразно применять несколько плоских узких индукторов, помещенных по периметру вдоль оси трубопровода [3].

Конструкция индуктора нагревателя определяется формой и материалом нагреваемой поверхности. По конструкции индукторов они могут быть плоскими, дуговыми, кольцевыми и соленоидными (трубчатыми).

Плоские и дуговые индукционные нагреватели можно классифицировать по относительному расположению индукторов и нагреваемых поверхностей (роторов) – на односторонние и двусторонние, соответственно с одним или двумя индукторами (плоскими или дуговыми).

Плоский индуктор представляет собой магнитопровод, набранный из листов электротехнической стали, с пазами в которые уложены секции обмотки. Магнитопровод зажат при помощи шпилек уголками, которые служат рамой индуктора. В двухстороннем нагревателе ротор располагается в зазоре между индукторами, обращенными друг к другу активными поверхностями магнитопроводов.

Поскольку индукционный нагреватель фактически представляет собой развернутый статор асинхронной явнополюсной или с распределенной обмоткой машины, роль заторможенного

ротора которой выполняет массивный ферромагнитный и токопроводящий материал, то для расчета такой установки приемлемы основные положения теории асинхронных круговых машин при работе в режиме короткого замыкания, линейных индукционных двигателей, работающих в заторможенном режиме и индукционных насосов [4].

#### **Обоснование предлагаемой конструкции нагревателя**

Нагрев металлических поверхностей и токопроводящих жидкостей, материалов, находящихся под ними, осуществляется трехфазным линейным индуктором, бегущее магнитное поле которого замыкается через немагнитный зазор по стенкам ферромагнитного материала и вне его, передавая тепловую энергию за счет вихревых токов.

Тепловой эффект обеспечивается как поперечным магнитным полем отдельных полюсов трехфазных индукторов, так и за счет бегущего магнитного поля, перемещающегося со значительной скоростью (25,8 м/с) вдоль поверхности магнитопровода, что приближает эту установку к высокочастотной и существенно улучшает тепловые и энергетические показатели (репрезентативный пример 1).

При разработке индукционного нагревателя принимаются за основу следующие принципы:

- индукторы должны питаться переменным током промышленной частоты исходя из требований экономичности, удобства питания и обслуживания, минимального количества оборудования;
- индукторы должны быть трехфазными, работающими в режиме заторможенного асинхронного двигателя (линейного) с целью улучшения энергетических и тепловых характеристик;
- конструкция индукторов должна быть упрощена. С этой целью принимается прямоугольная конфигурация пазов магнитопровода и катушечная обмотка;
- для унификации нагревательного устройства принимается модульная конструкция, представляющая собой совокупность отдельных одинаковых трехфазных линейных индукторов.

При диаметрах труб более 100 мм целесообразно применение нескольких плоских узких индукторов установленных по периметру вдоль оси трубопровода. Применение индукторов ограниченной ширины позволит существенно уменьшить средний немагнитный зазор, от которого зависят энергетические и тепловые показатели нагревателя. Применение таких индукторов позволит значительно унифицировать конструкцию, применяя однотипные модульные индукторы для широкого диапазона нагреваемых поверхностей от

трубопроводов и металлических вместилищ различной конфигурации до плоской поверхности.

Модульный плоский индукционный нагреватель состоит из двух линейных индукторов, обращенных активными поверхностями к нагреваемой поверхности так, что между ними существует определенный немагнитный зазор.

Конструкция крепления индукторов к раме должна предусматривать возможность поворота их относительно продольной оси на определенный угол и фиксацию, что обеспечивает возможность применения нагревателя как для металлических плоских поверхностей и с различным радиусом криволинейности, так и трубопроводов различного диаметра.

Интерес для практических целей представляет модульный плоский нагреватель, рассчитанный в репрезентативном примере 1.

**Репрезентативный пример 1.** Требуется

Таблица 2 – Технические характеристикипредварительно рассчитанного модульного нагревателя

№	Параметр	Использованная формула	Расчетные значения
2	Допустимый ток в обмотке индуктора	$I_{дон} = j \cdot s_{np}$ где $j = 5 \text{ А/мм}^2$ – допустимая плотность тока	$I_{дон} = 28,5 \text{ А}$
3	Допустимая полная мощность при включении в сеть $U_{\phi} = 220 \text{ В}$	$S_{дон} = 3 \cdot I_{дон} \cdot U_{\phi} \cdot 10^{-3}$	$S_{дон} = 18,81 \text{ кВт}$
4	Активная мощность при $\cos\phi = 0,8$	$P_1 = S_{дон} \cdot \cos\phi$	$P_1 = 15 \text{ кВт}$
5	Число полюсов Число витков катушки	Зубцовый шаг $t_z = 8,6 \text{ см}$ , ширина зубца $b_z = 3,0 \text{ см}$	$2P = 4$ $S_n = 119$
6	Число витков в фазе обмотки нагревателя	$w = 2P \cdot S_n$	$w = 476$
7	Полюсной шаг обмотки, см	$\tau = t_z \cdot m \cdot q$ где $m$ – число фаз, $q = 1$ – число пазов на полюс и фазу	$\tau = 25,8 \text{ см}$
8	Скорость бегущего магнитного поля	$v_c = 2\tau \cdot f \cdot 10^{-2}$	$v_c = 25,8 \text{ м/с}$
9	Общая расчетная длина индуктора	$l_0 = 2p \cdot \tau$	$l_0 = 103,2$
10	Габаритные размеры индуктора, мм	длина · ширина · высота	$516 \cdot 84 \cdot 130$
11	Суммарное активное и индуктивное сопротивление фазы	$r = \rho_m \cdot w \cdot 2\tau / S$ $X = 7,7 \text{ Ом}$	$r = 0,48 \text{ Ом}$ $X = 7,7 \text{ Ом}$
12	Полное сопротивление фазы	$Z_{\phi} = \sqrt{(X^2 + r^2)}$	$Z_{\phi} = 7,75 \text{ Ом}$
13	Фазный ток при включении обмотки в звезду в сеть 220 В	$I_{\phi} = U_{\phi} / Z_{\phi}$	$I_{\phi} = 28 \text{ А}$
14	Потери мощности в обмотке	$P_2 = 3 \cdot I_{\phi}^2 \cdot r \cdot 10^{-3}$	$P_2 = 1,13 \text{ кВт}$
15	Активная мощность нагревателя	$P = P_1 + P_2$	$P = 16,13 \text{ кВт}$
16	Полная мощность	$S = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot 10^{-3}$	$S = 18,5 \text{ кВт}$
17	Коэффициент мощности	$\eta_{мощ.} = P/S$	0,76
18	Коэффициент полезного действия	$\eta = P_1/P$	$\eta = 0,92$

Конструктивно модульный плоский индукционный нагреватель состоит из двух линейных индукторов, обращенных активными поверхностями друг к другу, обмоточных катушек 3 (рис. 1). При этом шпильки (5), крепящие индукторы друг к другу, позволяют регулировать зазор между индукторами в широком диапазоне. Маг-

рассчитать модульный плоский индукционный нагреватель по исходным данным, приведенным в табл. 1. В табл. 2 приведены технические характеристики, предварительно рассчитанного модульного нагревателя, с исходными данными, приведенными в табл. 1 [3, 5, 6].

Таблица 1 – Исходные данные для расчета модульного нагревателя

Исходные данные	
Провод марки ПЭВ-1	диаметром 2,7 мм, сечением $s_{np} = 5,7 \text{ мм}^2$
Скольжение	$s = 1$
Немагнитный зазор	$\delta = 0,5 \text{ см}$
Толщина стали ротора	$\delta_{ст} = 0,4 \text{ см}$
Частота питающей сети	$f = 50 \text{ Гц}$ ;
Удельное сопротивление стали ротора	$\rho_{ст} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$
Удельное сопротивление меди обмотки	$\rho_m = 2,17 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$

нитопровод 2 выполнен из листов электротехнической стали в виде пакетов. Пакеты формируются при помощи уголков (4) и стягивающих шпилек (5) [1]. В номинальном режиме работы обмотки одноименных фаз двух индукторов включаются последовательно, а фазы – в звезду, при питании от трехфазной сети переменного тока напряжением 380 В.

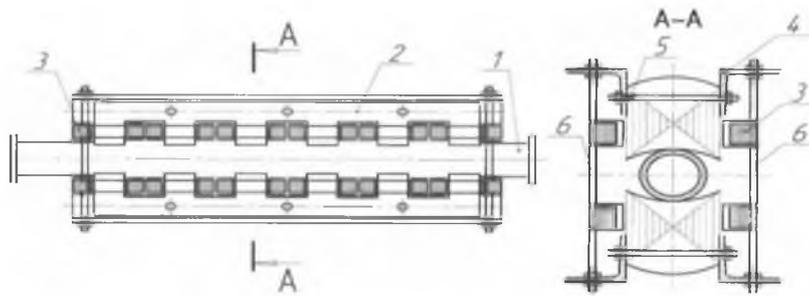


Рисунок 1 – Схема подключения модульных плоских индукционных нагревателей: 1 - трубопровод; 2 - магнитопровод; 3 - обмоточные секции (катушки); 4 - уголки; 5 - стягивающие шпильки; 6 - шпильки крепления индукторов

Схема включения плоского индукционного нагревателя в сеть питания практически ничем не отличается от схемы включения обмоток обычных асинхронных двигателей.

Если для нагрева металлоконструкций требуется значительная мощность, то система может набираться из двух-, трех-, четырех и более модульных индукционных нагревателей, которые устанавливают в нагреваемую конструкцию. Регулирование температуры и скорости нагрева можно осуществлять количеством включенных модулей.

Регулирование мощности, передаваемой металлоконструкции плоскими индукционными нагревателями, возможно следующими способами:

- изменением сопротивления или напряжения в цепи питания индукторов;
- изменением варианта включения обмоток индукторов (параллельно, последовательно, звезда, треугольник);
- изменением числа включенных индукторов;
- изменением немагнитного зазора (с уменьшением зазора мощность увеличивается);
- комбинацией вышеперечисленных способов.

В случае применения нагревателей для водного отопления жилых помещений и цехов (замкнутая система трубопровода), температура и скорость нагрева могут регулироваться автоматически под контролем термореле за счет количества включенных модульных нагревателей и длительности их включения.

#### Заключение

Индукционные модульные нагреватели могут быть применены:

- для размораживания трубопроводов с водой различного диаметра без их демонтажа;
- для индивидуального водяного отопления жилых помещений и цехов (по замкнутому трубопроводу);
- для прогрева швов стальных труб перед сваркой;

- для нагрева воды в металлических баках различной формы и размеров;

- для нагрева металлических пластин в полу временных помещений для их отопления;

- для нагрева стенок цистерн с вязкими жидкостями в зимнее время.

Репрезентативный пример расчета модульного плоского индукционного нагревателя показал простоту его расчета. Конструкция плоского индукционного нагревателя позволит монтировать однотипные модульные индукторы на действующих трубопроводах любого диаметра без их демонтажа в любом месте на прямолинейных участках. Модульный плоский индукционный нагреватель дает возможность регулирования мощности нагрева в довольно широком диапазоне. Передача тепловой энергии без непосредственного контакта с трубопроводом бегущим магнитным и пульсирующим полем позволяет создавать нагреватель практически любой мощности, состоящий из отдельных модульных индукторов.

#### Литература

1. Дубровин Р.Г., Таламанов В.Н., Козенкова Г.Л. Применение индукционного плоского линейного нагревателя при эксплуатации портовых перегрузочных комплексов для наливных грузов. // Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – № 4 (101). – С. 127-131
2. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974.
3. Лекомцев П.Л., Дресвянникова С.В., Корепанов А.С., Соловьев А.С. Инженерный расчет индукционных водонагревателей // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». – 2007-2016.
4. Жуковский В. Е, Кувалдин А. Б. Индукционные установки низкотемпературного нагрева для различных технологических процессов. // Электротехника. – 1986. – № 3. – С. 16-19.
5. Электротермическое оборудование: справочник / под ред. А. П. Альтгаузена. – М.: Энергия, 1980. – 416 с.
6. Павлов Н. А. Инженерные тепловые расчеты индукционных нагревателей. - М.: Энергия, 1978. - 120 с.

## References

1. Dubrovin R.G., Talamanov V.N., Kozenkova G.L. Primenenie indukcionnogo ploskogo linejnogo nagrevatelja pri jekspluatácii portovyh peregruzochnyh kompleksov dlja nalivnyh gruzov. Nauchnyj sbornik «Jekspluatacija morskogo transporta» FGBOU VO "GMU imeni admirala F.F. Ushakova", 2021 № 4 (101). – s.127-131
2. Sluhockij A.E., Ryskin S.E. Induktory dlja indukcionnogo nagreva. Jenergija, L.: 1974.
3. Lekomcev P.L., Dresvjannikova S.V., Korepanov A.S., Solov'ev A.S. Inzhenernyj raschet indukcionnyh vodonagrevatelej. – Jelektronnyj nauchnyj zhurnal «Inzhenernyj vestnik Dona», 2007-2016.
4. Zhukovskij B. E, Kuvaldin A. B. Indukcionnye ustanovki nizkotemperaturnogo nagreva dlja razlichnyh tehnologicheskikh processov. // Jeletrotehnika.- 1986.- № 3.- S. 16-19.
5. Jeletrotermicheskoe oborudovanie: spravocnik /pod red. A. P. Al'tgauzena. - M.: Jenergija, 1980. - 416 s.
6. Pavlov N. A. Inzhenernye teplovyje raschety indukcionnyh nagrevatelej. - M.: Jenergija, 1978. -120 s.

УДК 656.073

DOI: 10.34046/aumsuomt105/14

## МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ ПЕРЕВОЗОК

*Я.Я. Эглит, доктор технических наук, профессор,  
К.Я. Эглите, доктор технических наук, профессор  
М.А., Шаповалова, кандидат технических наук, доцент  
В.В. Шкода, кандидат педагогических наук, доцент  
А.В. Суховерхов*

В данной статье в общих чертах рассматривается обоснование эффективности транспортных процессов при помощи метода имитационного моделирования. В основе данной статьи не лежит определённый пример либо стратегия использования данного метода той или иной транспортной компанией.

**Ключевые слова:** транспортная система, имитационное моделирование, оптимальность, эффективность, прибыль.

## METHODICAL APPROACH TO SUBSTANTIATING THE OPTIMAL VERSION OF REFRIGERATED TRANSPORT

*Y. Eglit, K. Eglite, M. Shapovalova, V.V. Shkoda, A. Sukhoverkhov*

This article shows the efficiency of transport processes using the method of simulation modeling. This article is not based on a specific example or strategy, used by a particular shipping company.

**Key words:** ransport system, simulation modeling, optimality, efficiency, profit.

### 1. Введение

Целью анализа транспортных систем является нахождение оптимального варианта перевозки груза. Вне зависимости от типа груза и вида перевозки, именно оптимальность является важнейшим аспектом и целью каждого транспортного анализа. Она выражается во времени перевозки и расходах, которые должны быть сведены к минимуму. Оптимальным вариантом является тот вариант, который отражает наименьшие издержки при наименьших временных затратах, рассчитанный при фиксированной единице дохода для всех вариантов перевозочных процессов.

Если рассмотреть каждый из вариантов анализа более детально, то следует учитывать различные показатели в той или иной форме работ. К примеру, характеристики судна (дедвейт, осадка, размеры судна и т.д.), либо показатели порта (длина фарватера, максимальная осадка у причала и т.д.) являются неотъемлемыми факторами для расчёта оптимальности при перевозке грузов морем. Но в конечном счёте, в коммерческом анализе морских перевозок, важнейшим показателем

является прибыль. Именно она и определяет эффективность того или иного варианта перевозки и является целью коммерческого анализа транспортного процесса, вне зависимости от типа груза.

### 2. Особенности метода имитационного моделирования

Рассматривая расчёт оптимальности работы рефрижераторного терминала следует учитывать множество факторов, связанных со спецификой работы рефрижераторного терминала. Если говорить об универсальности метода, то следует упомянуть, что данное утверждение подходит для различных видов терминалов, следовательно, при расчёте оптимальности работы того или иного терминала, следует учитывать специфику его функционирования.

Для выявления оптимальности перевозки используется транспортная задача, которая отражает аспекты эффективности того или иного варианта. Несмотря на то, что данный раздел линейного программирования получил большое рас-