

УДК631.371:621.365

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ЭМИН НА БАЗЕ СТАТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Назарьян Г.Н., к.т.н.,

Назарьян М.Г., инженер.

*Таврический государственный агротехнологический университет*

Тел. (0619)42-31-59

**Аннотация** – работа посвящена обоснованию целенаправленной методики электромагнитного расчета водонагревателей ЭМИН, обеспечивающей длительную их работу по условиям нагрева в режиме установившегося тока короткого замыкания с высокими энергетическими показателями (КПД,  $\cos\phi$ )

**Ключевые слова** – конструктивное исполнение, особенности расчета, исходные данные, электромагнитные нагрузки, ток к.з., индуктор, нагреватель, магнитная индукция, параметры.

*Постановка проблемы.* ЭМИН относятся к новым индукционным водонагревателям промышленной частоты, получившим применение для горячего водоснабжения животноводческих ферм и комплексов, а также для отопления жилых, административных и производственных зданий и сооружений АПК.

Конструктивные схемы устройства ЭМИН представлены на рис. 1. Основными элементами конструкции ЭМИН являются: индуктор (2), представляющий собой статор базового асинхронного двигателя (АД) с трехфазной обмоткой (3) и нагреватель (4) в виде толстостенной трубы из ферромагнитного материала, закрепленной в расточке магнитопровода индуктора (2).

Принцип действия ЭМИН. При подключении обмотки индуктора в сеть переменного тока образуется вращающееся магнитное поле, как это имеет место в АД. Поле при вращении пересекает неподвижный нагреватель-трубу и индуцирует в стенках трубы ЭДС и вихревые токи, а также осуществляет вращательное перемагничивание материала, из которого выполнен ферромагнитный нагреватель. Возникающие при этом электрические и магнитные потери обуславливают интенсивный нагрев трубы и протекающей по ней воды и другой текущей жидкости.

Согласно принципа действия, водонагреватели ЭМИН при включении в сеть работают, по аналогии с АД с заторможенным ротором, в режиме короткого замыкания (к.з.). Если при этом в качестве обмотки индуктора используется обмотка статора базового АД, то при номинальном напряжении питающей сети ток к.з. обычно равен  $I_{\kappa} = 2...3 I_{ном}$ , что недопустимо по условиям нагрева обмотки. Поэтому возникает необходимость принятия мер с целью снижения тока  $I_{\kappa}$  в обмотке индуктора и обеспечения в установившемся режиме работы условия

$$I_{\kappa} \leq [I_{\kappa}]_{доп} = I_{In}, \quad (1)$$

где  $I_{In}$  – номинальный ток ЭМИН равный току базового АД (табл. 1).

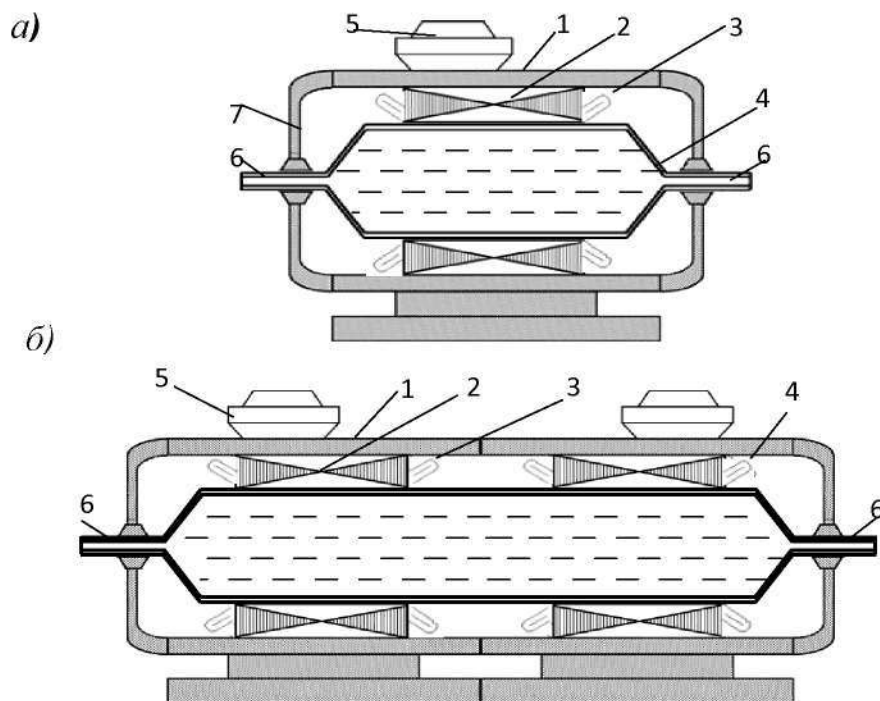


Рис. 1. Конструктивная схема устройства односекционного (а) и двухсекционного (б) ЭМИН:

1 – корпус; 2 – магнитопровод индуктора; 3 – обмотка индуктора; 4 – нагреватель-труба; 5 – клемная коробка; 6 – входной и выходной патрубки.

На практике это достигается двумя путями:

1) применением схемных решений при включении обмоток индукторов ЭМИН на пониженное питающее напряжение с использова-

нием обмоток статоров базовых АД. Подробно этот вопрос рассмотрен в [2];

2) в результате целенаправленного электромагнитного расчета ЭМИН с заменой обмоток статора базовых АД и обеспечения длительной и надежной работы ЭМИН при номинальном напряжении и высоких энергетических показателях (КПД,  $\cos\varphi$ ).

Таким образом, не вызывает сомнения актуальность и практическая полезность разработки инженерной методики целенаправленного инженерного расчета ЭМИН, выполняемых на базе статоров АД, в том числе и в условиях хозяйства.

*Анализ последних исследований.* Основы теории и энергетика ЭМИН, а также обоснование оптимальных параметров ЭМИН подробно рассмотрены в [1]. В работе [2] приводятся схемы включения ЭМИН в сеть и рекомендации по их изготовлению, а также пример расчета обмотки индуктора ЭМИН.

*Формулировка целей статьи.* Основной целью является обоснование сравнительно простой инженерной методики электромагнитного расчета ЭМИН, обеспечивающей надежную и эффективную их работу в реальных условиях эксплуатации.

*Основная часть.*

### 1. Расчет полезной мощности ЭМИН.

Для ЭМИН различного назначения необходимы следующие исходные технологические условия:  $Q$  – производительность, л/ч;  $m$  – масса нагреваемой воды, кг;  $\theta_1; \theta_2$  – начальная и конечная температура воды,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C_m = 4,19$  кДж/(кг $^{\circ}\text{C}$ ) – удельная теплоемкость воды;  $t$  – продолжительность нагрева воды, ч.

Для ЭМИН проточного действия, кВт

$$P_2 = \frac{Q \cdot C_m (\theta_2 - \theta_1)}{3600}. \quad (2)$$

Для ЭМИН периодического действия с аккумулирующей емкостью

$$P_2 = \frac{m \cdot C_m (\theta_2 - \theta_1)}{t}. \quad (3)$$

Для отопительной установки

$$P_2 = q_{om} \cdot V (\theta_B - \theta_H) \cdot 10^3, \quad (4)$$

где  $q_{om}$  – удельная тепловая характеристика зданий и сооружений, Вт/(м $^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ), приводится в [5];

$V$  – об'єм здания по наружному обмеру, м<sup>3</sup>;  
 $\theta_B$  – середня расчетная температура внутри основных помещений здания, °С;  
 $\theta_H$  – расчетная зимняя температура наружного воздуха, °С. Для юга Украины принимается  $\theta_H = -25^{\circ}\text{C}$ .

Электромагнитный КПД ЭМИН

$$\eta_{\text{э}} = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{P_1}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{ЭМ}}$  – электромагнитная мощность, передаваемая от обмотки электромагнитным путем в нагреватель;  
 $P_1$  – мощность, потребляемая из сети.

Тепловой КПД

$$\eta_T = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_T} = \frac{P_2}{P_{\text{ЭМ}}}. \quad (6)$$

КПД ЭМИН с учетом тепловой сети

$$\eta_B = \eta_{\text{э}} \cdot \eta_T \cdot \eta_{\text{ТС}}, \quad (7)$$

где  $\eta_{\text{ТС}}$  – КПД тепловой сети.

Таким образом, потребляемая мощность из сети будет определяться

$$P_1 = P_2 / \eta_B. \quad (8)$$

Уравнения для расчета КПД и cosφ приводятся в [2]. В практических расчетах можно принять

$$\eta_{\text{э}} = 0,95 \dots 0,97; \eta_B = 0,96 \dots 0,98; \eta_{\text{ТС}} = 0,9 \dots 0,94. \quad (9)$$

## 2. Выбор конструктивного исполнения ЭМИН.

Выбор конструкции ЭМИН определяется суммарной величиной полезной тепловой мощности  $P_{\text{э}}$ , определенной по уравнениям (2), (3) и (4), и реальном наличии АД, которые могут быть использованы в качестве базовых для изготовления. При этом рекомендуется при  $D_2 > 30$  кВт использовать многосекционное исполнение ЭМИН с общим нагревателем (рис. 1, б). Это позволяет практически изготовить ЭМИН любой мощности и производительности. В случае многосек-

ционной конструкции водонагревателя, следует использовать четное число секций с попарным включением в сеть индукторов с встречным направлением вращающегося поля. Это необходимо для взаимной компенсации электромагнитных моментов, создаваемых каждой секцией и действующих на общий нагреватель-трубу. При этом в ЭМИН не возникают механические усилия и напряжения в нагревателе, опорных элементах конструкции и фундаменте.

### 3. Электромагнитный расчет обмотки индуктора.

Исходные данные базового АД.

Таблица 1 – Номинальные данные АД

Типо-размер	$P_n$ , кВт	$U_{1n}$ , В	Схема включения обмотки	$n_n$ , об/мин	$I_{1n}$ , А	$2p$	$\eta$ , %	$\cos\varphi_n$

Таблица 2 – Геометрические размеры (рис. 2)

$H$ , мм	$D_a$ , мм	$D_l$ , мм	$l_l$ , мм	$\delta$ , мм	$Z_1$	Размеры паза, мм				
						$b_1$	$b_2$	$h$	$e$	$m$

Таблица 3 – Данные обмоток и статора

$W_1$	Шаг, у	$u_n$	$n_{эл}$	$a$	$d_2$ , мм	$d_{u3}$ , мм	$k_{об1}$	$l_{ср}$ , мм	$R_1(20^\theta)$ , Ом	$G_m$ , кг

### 4. Ограничения электромагнитных нагрузок

Вводятся с целью обеспечения условия (1) в режиме установившегося короткого замыкания при номинальном питающем напряжении, который является номинальным эксплуатационным режимом работы ЭМИН, а также ограничения степени насыщения магнитной цепи ЭМИН на участке ферромагнитного нагревателя.

Принимаются следующие ограничения электромагнитных нагрузок при расчетах ЭМИН.

Магнитная индукция в зазоре на стыке между стенкой нагревателя и поверхностью расточки нагревателя должна быть в пределах

$$B_\delta \leq [B_\delta]_{дон} = 0,4 \dots 0,5 \text{ Тл.} \quad (10)$$

Магнитная индукция в расчетном активном слое нагревателя  $\Delta$ , равном глубине проникновения электромагнитной волны в пассивном нагревателе, должна быть в пределах

$$B_{\Delta} \leq [B_{\Delta}]_{\text{дон}} = 1,6 \dots 2,0 \text{ Тл.} \quad (11)$$

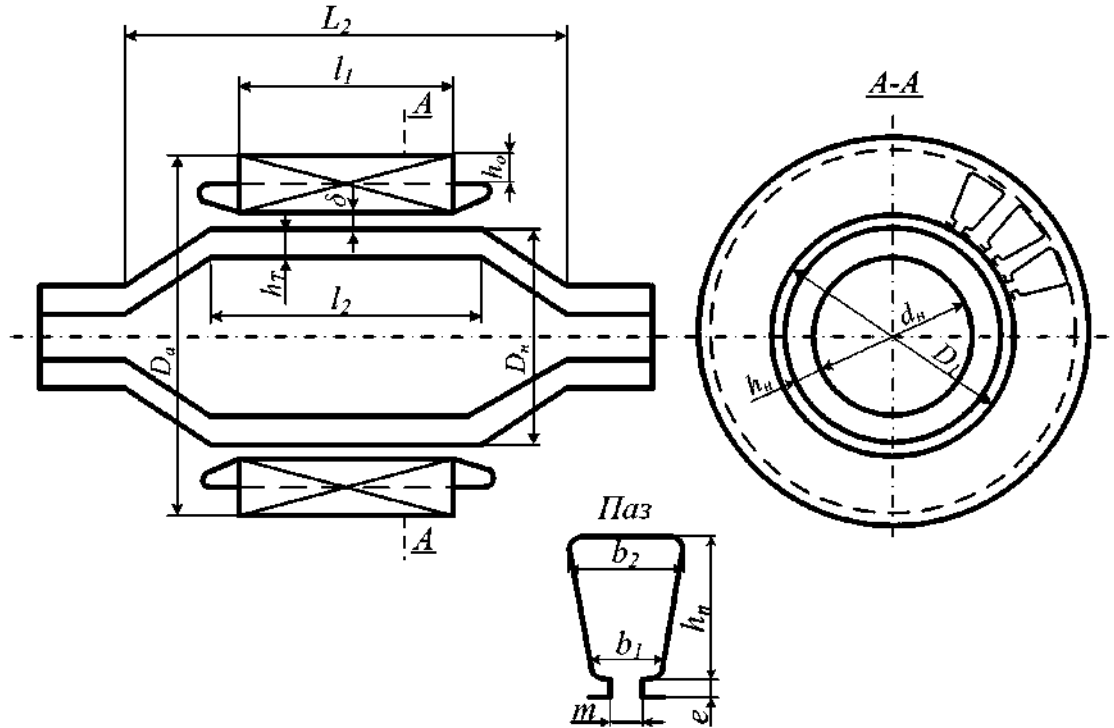


Рис. 2. Расчетная электромагнитная схема ЭМИН.

Линейная нагрузка

$$A \leq [A]_{\text{дон}} = 350 \dots 460 \text{ А / см.} \quad (12)$$

Плотность тока в обмотке индуктора:

– для изоляции класса В для базовых АД с  $H \leq 130$  мм

$$J_B \leq [J_B]_{\text{дон}} = 6,5 \dots 7,5 \text{ А / мм}^2. \quad (13)$$

– для изоляции класса F для базовых АД с  $H \geq 160$  мм

$$J_F \leq [J_F]_{\text{дон}} = 8 \dots 9 \text{ А / мм}^2. \quad (14)$$

Коэффициент заполнения паза индуктора медью должен находиться в пределах

$$K_{3M} \leq [K_{3M}]_{\text{дон}} = 0,4 \dots 0,5. \quad (15)$$

Приведенные условия и ограничения (10) ... (15) по существу являются лимитерами электромагнитного расчета ЭМИН, обеспечивающими получение оптимальных параметров ЭМИН и высокие энергетические показатели при номинальном напряжении и токе индуктора в соответствии с условием (1)  $I_k \leq I_{\text{ном}}$ .

#### 5. Расчет числа витков обмотки индуктора. Магнитный поток ЭМИН

$$\Phi = 2 / \pi \cdot \tau \cdot l_1 \cdot B_\delta. \quad (16)$$

При этом

$$\tau = \frac{\pi D_1}{2p}, \quad (17)$$

где  $D_1$  – диаметр расточки индуктора.

В соответствии с (10) принимаем  $B_\delta = 0,45$  Тл.

Магнитный поток  $\Phi$  определяется по (16) с учетом (17) и индукции  $B_\delta$ , правильность выбора величины которой проверяется по величине расчетной индукции в активном слое нагревателя  $B_\Delta$ , которая согласно ограничения (11) не должна превышать значение 2 Тл, и определяется по уравнению

$$B_\Delta = \frac{\Phi}{2\Delta \cdot l_1 \cdot K_L}, \quad (18)$$

где  $K_L$  – коэффициент активной длины нагревателя равный  $K_L = L_2 / l_2$ , обычно  $K_L = 1,5 \dots 1,7$ .

$\Delta$  – эквивалентная глубина проникновения электромагнитной волны на поверхности нагревателя.

При этом

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho_{c115^\circ}}{\pi \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot \mu_e}}, \quad (19)$$

где  $\mu_e$  – относительная магнитная проницаемость стали нагревателя;  
 $\rho_{c115^\circ}$  – удельное сопротивление стали нагревателя при расчетной температуре  $115^\circ\text{C}$ ;  
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная проницаемость вакуума.  
 Данные расчета по (19) для трубных сталей *ст10* и *ст20* и частоте  $f_1 = 50$  Гц приведены в табл. 4.

Таблица 4

$B_\Delta, \text{ Тл}$	1,75	1,8	1,85	1,9	1,95	2,0
$\mu_e$	74	64	58	48	38	32
$\Delta, \text{ мм}$	4,5	4,9	5,2	5,6	6,3	7,0

Число витков фазы обмотки индуктора

$$W_1 = \frac{K_e \cdot U_{1н}}{4,44 \cdot f_1 \cdot K_{об1} \cdot \Phi}, \quad (20)$$

где  $K_e$  – коэффициент ЭДС;  
 $K_{об1}$  – обмоточный коэффициент.  
 При этом, согласно [3]

$$K_e = 0,98 - 0,005 p$$

Величина  $K_{об1}$  зависит от типа обмотки. Обычно при пересчете и замене обмотки индуктора тип обмотки выбирается таким же как и у базового статора АД, обмоточный коэффициент, который приводится в табл. 3. Как правило, коэффициент  $K_{об1}$  находится в пределах  $K_{об1} = 0,92 \dots 0,96$ .

Количество витков обмотки, определенное по (20) округляется до целого числа.

#### 6. Выбор марки и сечения обмоточного провода.

С учетом температурного режима работы ЭМИН рекомендуется использовать обмоточный провод марки ПЭТ-155, ПЭТ-155А, ПЭТ-155Г и др. класса нагревостойкости изоляции F с длительно допустимой температурой  $155^\circ\text{C}$ .

Сечение эффективного голого провода

$$q_{эф} = \frac{I_{1н}}{a \cdot j_F}; \quad (21)$$



где  $j_F$  – плотность тока, принимается по (15).

При этом значение  $j_F$  выбирается таким образом, чтобы величина  $q_{\text{эф}}$  ЭМИН была меньше  $q_{\text{эф}}$  обмотки базового АД в 1,7 раза. Это способствует уменьшению диаметра обмоточного провода ЭМИН в 1,3 раза. Полученное значение  $q_{\text{эф}}$  принимается равным стандартной величине, например, по табл. П-28 [3] и определяются номинальный диаметр неизолированного провода  $d_z$  и средний диаметр изолированного провода  $d_{из}$ .

Фактическая плотность тока определяется по значению  $q'_{\text{эф}}$

$$j_F = \frac{I_{1н}}{a \cdot q'_{\text{эф}}}. \quad (22)$$

Коэффициент заполнения паза индуктора медью

$$K_{3M} = \frac{d_z^2 \cdot u_n \cdot n_{эл}}{S_n}, \quad (23)$$

где  $u_n; n_{эл}$  – число проводников в пазу и число элементарных проводников, приводится в исходных данных в табл. 3;

$S_n$  – площадь паза, мм<sup>2</sup>.

Для паза трапецидальной формы с учетом с учетом размеров паза базового АД, приведенных в табл. 2, значение  $S_n$  можно определить по соотношению

$$S_n = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h \quad (24)$$

Для реального обеспечения величины коэффициента  $K_{3M}$  в допустимых пределах (15) рекомендуется при изготовлении обмотки ЭМИН использовать в качестве пазовой изоляции тонкую стеклоткань и обмоточный провод с двойной эмалевой или лучше самоклеющейся изоляцией.

Масса медного обмоточного провода определяется по уравнению

$$G_M = 3\gamma \cdot l_{cp} \cdot W_I \cdot q_{\text{эф}} \cdot n_{эл} \cdot a \cdot 10^{-6}, \quad (25)$$

где  $\gamma = 8900$  кг/м<sup>3</sup> – плотность меди;

$l_{cp}$  – средняя длина обмотки индуктора, м. Принимается равной  $l_{н0}$  базового АД, приведенной в табл. 3.

### 7. Расчет параметров и тока индуктора.

Такой расчет проводится с целью проверки выполнимости условия, что расчетный ток обмотки индуктора не превышает номинального значения  $I_k \leq I_{In}$ . Активное сопротивление фазы обмотки индуктора

$$R_1 = \rho_{m115^\circ} \frac{l_{cp} \cdot W_1}{q_{\text{ф}} \cdot a \cdot n_{\text{эл}}}, \quad (26)$$

где  $\rho_{m115^\circ}$  – удельное сопротивление меди при расчетной температуре.

принимается  $\rho_{m115^\circ} = 2,43 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

При этом

$$\rho_{m115^\circ} = \rho_{m20^\circ} \frac{235 + 115}{235 + 20}. \quad (27)$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки

$$x_1 = \frac{4\pi \cdot \mu_0 \cdot W_1^2 \cdot l_1}{p \cdot q} \Sigma\lambda, \quad (28)$$

где  $q$  – число пазов на полюс и фазу;

$\Sigma\lambda$  – суммарный коэффициент магнитной проводимости. Обычно  $\Sigma\lambda = 3,3 \dots 3,8$  [2].

При этом

$$q_1 = z_1 / 2 p m, \quad (29)$$

где  $z_1$  – число зубцов индуктора, приводится в исходных данных в табл. 2.

Приведенное значение активного сопротивления контура нагревателя [2]

$$R_2' = \frac{4m \cdot K_{\text{об1}} \cdot W_1^2 \cdot l_1 \cdot \rho_{c115^\circ} \cdot a_R \cdot K_R}{\pi D_1 \cdot \Delta}, \quad (30)$$

где  $\rho_{c115^\circ}$  – удельное сопротивление стали,  $\rho_{c115^\circ} = 2,8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м – для стали *ст20*;

$a_R = 1,4$  – коэффициент изменения активного сопротивления в массивной стали [4];

$K_R$  – коэффициент краевого эффекта, учитывающий увеличение эквивалентного сопротивления в следствии эффекта вытеснения тока в торцевой части массивного ферромагнитного нагревателя конечной длины.

При этом

$$K_R = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\tau}{l_2} = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\tau}{K_L \cdot l_1}. \quad (31)$$

Приведенное индуктивное сопротивление контура нагревателя в соответствии с [2] принимается равным

$$X'_2 = 0,6R'_2; \quad (32)$$

Активное и индуктивное сопротивление к.з. ЭМИН определяются суммой

$$R_k = R_l + C_l R'_2; \quad X_k = X_l + C_l X'_2 \quad (33)$$

и полное сопротивление к.з.

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}, \quad (34)$$

где  $C_l$  – поправочный коэффициент равный 1,02... 1,06.

В практических расчетах принимается  $C_l = 1,04$ .

Ток установившегося короткого замыкания, являющегося номинальным эксплуатационным режимом работы ЭМИН, определяется

$$I_k = \frac{U_{lнф}}{Z_k} \quad (35)$$

где  $U_{lнф}$  – номинальное фазное напряжение ЭМИН.

Если полученное значение тока  $I_k$  не обеспечивает выполнение условия (1)  $I_k \leq I_{ln}$ , то необходимо внести коррективы в расчетное определение числа витков и параметров, главным образом за счет соответствующего изменения магнитной индукции  $B_\delta$  по (10) и величины  $q_{\text{эф}}$  по (21), определяющего сопротивление  $R_l$  по (26). Существенным также является выбор геометрических размеров нагревателя ( $L_1; l_2$  и особенно толщины стенки, которая должна быть  $h_m \geq 8...12$  мм), а так-

же физические свойства ферромагнитного нагревателя ( $\rho_{ст}, \mu_e$ ) оказывают существенное влияние на величину эквивалентных приведенных сопротивлений вторичного в электромагнитном отношении контура нагревателя  $R'_2; X'_2$  и  $Z'_2$ . Оптимальные значения относительных параметров нагревателя, обеспечивающие максимальные энергетические показатели (КПД и  $\cos\varphi_1$ ) рассматриваются и приводятся в [1].

Важно также отметить, что увеличение числа витков обмотки индуктора ЭМИН в сравнении с обмоткой базового АД в среднем в 1,3 раза обуславливает увеличение коэффициента мощности  $\cos\varphi_1$  электроводонагревателя. Это обстоятельство является весьма существенным для установок индукционного нагрева промышленной частоты. В монографии Л. Мадьяра [6] отмечается, что увеличение числа витков АД при ремонте на 10% уменьшает потребление реактивной мощности на 20%.

#### *Выводы*

1. В работе обоснована инженерная методика электромагнитного расчета и конструирования индукционных водонагревателей ЭМИН, обеспечивающая их изготовление на базе статоров АД практически любой требуемой мощности и высокими энергетическими показателями (КПД и  $\cos\varphi_1$ ), что получило практическое подтверждение при испытании и эксплуатации ЭМИН различной мощности в системах горячего водоснабжения и отопления.

2. Учитывая, что в настоящее время в фермерских хозяйствах и других структурах АПК накопилось большое количество вышедших из строя АД различных серий и мощности, в том числе и не подлежащих ремонту, поэтому предлагаемая сравнительно простая методика электромагнитного расчета ЭМИН на базе АД будет способствовать, по нашему мнению, их изготовлению в условиях хозяйств как альтернативных, надежных и эффективных электроводонагревателей.

#### *Литература:*

1. *Назарьян Г.Н.* Электромагнитные индукционные водонагреватели на базе статоров асинхронных двигателей / *Г.Н. Назарьян, М.Г. Назарьян* // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. Науково-виробничий журнал. – К.: НАУ, 2006. – №2 (17). – С. 46-55.

2. *Назарьян Г.Н.* Электромагнитный индукционный водонагреватель типа ЭМИН на базе статоров асинхронных двигателей / *Г.Н. Назарьян*: Техническое описание, конструирование и электромагнитный расчет. – Мелитополь: ТДАТУ, 2008. – 31 с.

3. *Копылов И.П.* Проектирование электрических машин / *И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков* и др. Под ред. *И.П. Копылова*. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

4. *Нейман Л.Р.* Поверхностный эффект в ферромагнитных телах / *Л.Р. Нейман.* – М.: ГЭИ, 1949. – 190 с.
5. *Захаров А.А.* Применение тепла в сельском хозяйстве / *А.А. Захаров.* – М.: Колос, 1980. – 311 с.
6. *Мадьяр Л.* Коэффициент мощности  $\cos\varphi$  / *Л. Мадьяр.* – М.-Л.: 1981. – 376 с.

## **ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК ІНДУКЦІЙНИХ ВОДОНАГРІВАЧІВ ЕМІН НА БАЗІ СТАТОРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ**

Назар'ян Г.Н., Назар'ян М.Г.

### *Анотація*

**Робота присвячена обґрунтуванню цілеспрямованої методики електромагнітного розрахунку водонагрівачів ЕМІН, що забезпечує тривалу їх роботу за умовами нагріву в режимі сталого струму короткого замикання з високими енергетичними показниками (ККД,  $\cos\varphi$ ).**

## **ELECTROMAGNETIC CALCULATION OF INDUCTION WATERWARMERS EMIN ON THE BASE OF ASYNCHRONOUS ENGINES STATORS**

G. Nazaryan, M. Nazaryan

### *Summary*

**Work is devoted the ground of purposeful method of electromagnetic calculation of waterwarmers EMIN, providing protracted their work on the terms of heating in the mode of the set current of short circuit with high power indexes (efficiency,  $\cos\varphi$ ).**