

Особенности теории и расчета индукционных электромагнитных насосов

ВИТКОВСКИЙ И.В., КИРИЛЛОВ И.Р., МАЛКОВ А.А., ОБУХОВ Д.М.,
ПРЕСЛИЦКИЙ Г.Б., СТЕПАНОВ В.В., ТАЛАЛОВ В.А.

Рассмотрены основные вопросы теории индукционных электромагнитных насосов (ЭМН) и современные методы их расчета. Приводится анализ электромагнитных, тепловых и прочностных характеристик ЭМН. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных значений основных параметров ЭМН.

Ключевые слова: электромагнитный насос, методы расчета, анализ характеристик, сравнение расчета и эксперимента

Индукционные электромагнитные насосы (ЭМН), главным образом трехфазные, нашли широкое применение для перекачивания жидких металлов в ядерной энергетике (реакторы на быстрых нейтронах), химической, металлургической промышленности и литейном производстве [1]. По принципу действия ЭМН являются аналогами асинхронных электрических машин, но вместо ротора в движение приводится жидкий металл. Наиболее употребительные типы ЭМН: цилиндрические линейные индукционные насосы (ЦЛИН), винтовые (ВИН) и плоские (ПЛИН) с каналами цилиндрического, винтового и плоского типов соответственно.

Конструкционные схемы насосов и общий вид ЭМН ЦЛИН 1,5/430, предназначенного для реакторной установки БН-800, приведены на рис. 1.

Отличия ЭМН от классических электрических машин заключаются в следующем:

немагнитный зазор ЭМН значительно больше, так как в нем располагается канал с перекачиваемой средой, имеющей вход в магнитное поле и выход из него. В жидком проводнике пространственное распределение скоростей, определяемое гидродинамическими особенностями течения и локальным распределением электромагнитных сил, может быть существенно неоднородным;

аналогично магнитной системе линейных асинхронных двигателей с ярко выраженными концевыми эффектами ЭМН типа ПЛИН и ЦЛИН имеют разомкнутый магнитопровод;

жидкие металлы в ЭМН имеют, как правило, высокую температуру: щелочные – до 550 °С, цветные – до 800 °С, чёрные – до 1500 °С.

Basic statements of the theory of induction electromagnetic pumps and modern methods for calculating them are addressed. An analysis of the electromagnetic, thermal, and strength characteristics of electromagnetic pumps is presented. A comparison between the calculated and experimental values of the basic parameters of electromagnetic pumps is given.

Key words: electromagnetic pump, calculation methods, analysis of characteristics, comparison of calculated and experimental data

Эти отличия потребовали разработки теории, методов расчета электромагнитных, магнитогидродинамических, тепловых характеристик ЭМН, экспериментального исследования. Имеется обширная литература по обсуждаемой проблеме (см., например, библиографию в [1]), а также материалы периодических международных конференций по магнитной гидродинамике «PAMIR» (Франция).

Следует отметить, что в СССР пионерская работа, посвященная особенностям теории электрических машин с разомкнутым магнитопроводом, была опубликована в журнале «Электричество» ещё в 1946 г. [2].

Настоящая статья ставит целью рассмотрение основных вопросов теории и разработки современных методов расчета индукционных ЭМН на базе работ, выполненных в НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова. Существенный вклад в разработку теории индукционных ЭМН внесен советскими учеными [3–5].

Анализ электромагнитных (магнитогидродинамических) процессов в ЭМН. Электромагнитное поле в немагнитном зазоре индукторов ЭМН должно рассчитываться в общем случае на основании уравнений магнитной гидродинамики с учетом движения жидкости:

$$\tilde{N}^2 A = - \eta_0 J; \quad (1)$$

$$J = s(u' B - \partial A / \partial t); \quad (2)$$

$$B = \tilde{N}' A; \quad (3)$$

$$\tilde{N}u = 0; \quad (4)$$

$$r \partial u / \partial t + r u \tilde{N}u = -\tilde{N}p + h \tilde{N}^2 u + J' B, \quad (5)$$

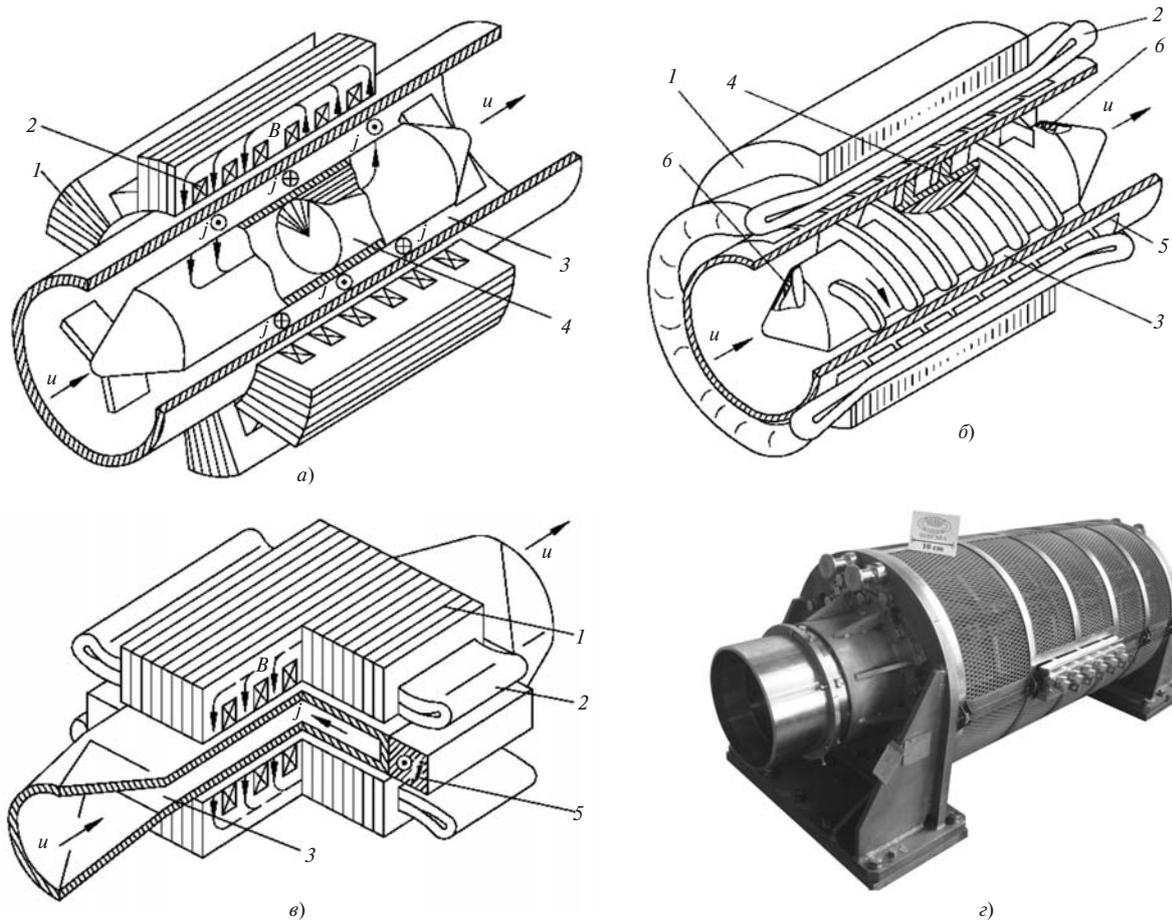


Рис. 1. Конструкционные схемы ЭМН: а – ЦЛИН; б – ВИН; в – ПЛИН; г – общий вид ЦЛИН 1,5/430; 1 – индуктор; 2 – обмотка; 3 – канал; 4 – внутренний сердечник; 5 – короткозамыкающая шина

где A – векторный магнитный потенциал; B, J, u – векторы индукции магнитного поля, плотности тока и скорости жидкого металла; s, r, h – удельная электрическая проводимость, плотность и динамическая вязкость жидкого металла; μ_0 – магнитная проницаемость немагнитного зазора.

Инженерная методика расчета основывается на решении указанных выше уравнений в одномерном приближении при течении жидкости как твердого тела с постоянной по сечению канала скоростью. Далее в интегральные характеристики вводятся поправочные коэффициенты, полученные на основе решения двумерных частных задач магнитной гидродинамики и подтвержденные соответствующими экспериментальными исследованиями [6].

Окончательно расчетные соотношения могут быть представлены в следующем виде:

электромагнитное давление, создаваемое насосом,

$$p_{\text{ЭМ}} = R_{m0} s p_n B_m^2 [k_{\text{Э}} K_{\text{ос}} k_{\text{пр2}} - C_0 (1 - s) / s] p / \mu_0;$$

электромагнитная мощность, передаваемая из первичной цепи (индуктора с обмоткой) во вторичную (канал с жидким металлом),

$$P_{\text{ЭМ}} = R_{m0} \omega s B_m^2 V (b / d) k_c k_{\text{Э}} K_{\text{ос}} k_{\text{пр1}} / (2 \mu_0);$$

развиваемое насосом давление (напор)

$$p = p_{\text{ЭМ}} - p_{\text{Г}};$$

полезная мощность

$$P_2 = pQ;$$

потребляемая из сети мощность

$$P_1 = P_{\text{ЭМ}} + P_{\text{обм}} + P_{\text{инд}};$$

КПД ЭМН

$$h = P_2 / P_1.$$

Здесь B_m – амплитуда результирующей индукции магнитного поля; $V = 2a2bL = 8abp_n t$ – объём канала ($2a, 2b, L$ – ширина, высота и длина канала); Q – расход жидкого металла; $P_{\text{обм}}$ – потери мощности в обмотке индуктора; $P_{\text{инд}}$ – потери мощности в железе индуктора; $p_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитное давление; $p_{\text{Г}}$ – гидравлические потери давления, определяемые, как правило, по формулам классической гидродинамики в пренебрежении влияния магнитного поля; $2d\phi$ – высота немагнитного зазора; p_n – число пар полюсов; s – скольжение; $R_{m0} = \mu_0 s \omega / a^2$ – магнитное число Рейнольдса;

$w = 2\pi f$ – круговая частота; f – частота питающего тока; $a = p/t$; t – длина полюсного деления; C_0 – коэффициент, учитывающий влияние профиля скорости по высоте канала; k_Σ – коэффициент, учитывающий затухание электромагнитного поля по толщине слоя жидкого металла, выражение для него в случае бесконечно длинного и широкого канала дано в [5]; $k_c = 1 + d_1/s$ – коэффициент, учитывающий потери в электропроводящих стенках канала, перпендикулярных рабочей (основной) составляющей магнитного поля, где $d_1 = s_k b_k / (sb)$; s_k, b_k – удельная электрическая проводимость и толщина стенок канала; $k_{пр1}, k_{пр2}$ – коэффициенты, учитывающие влияние продольного концевое эффекта, обусловленного ограниченностью длинны обмотки и индуктора, полученные из решения одномерной краевой задачи для случая цилиндрического канала [7] или двумерной – для плоского канала [8]; $K_{ос}$ – коэффициент, учитывающий влияние поперечного краевого эффекта, связанного с ограниченностью ширины канала и индуктора в ЭМН с плоскими и винтовыми каналами. Выражения для него, полученные из решения соответствующих двумерных задач, представлены в [5, 9].

Поверочный расчет ЭМН выполняется при необходимости на основе решения системы уравнений (1)–(5), как правило, численными методами. Для примера назовем расчет ЭМН типа ЦЛИН на большие значения параметров R_{m0}^s и электромагнитного взаимодействия $N = d\Phi_m^2 / r l t f$ (l – коэффициент трения). В этих условиях наблюдается взаимное влияние электромагнитных и гидродинамических процессов с развитием специфических вихревых течений, расчет которых проводится по специально разработанной численной методике [10].

Расчет магнитной цепи индуктора и обмотки возбуждения выполняется по известным соотношениям теории электрических машин. Сопоставление результатов расчета и эксперимента для номинального режима работы ЭМН ЦЛИН 1,5/430 и ЦЛИН 4/26 приведено в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	ЦЛИН 4/26		
	ЦЛИН 1,5/430	430±25	250±15
Температура перекачиваемого натрия $T_H, ^\circ\text{C}$	309±25	430±25	250±15
Расход $Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	429	26,1	39,4
Развиваемое насосом давление $p, \text{ МПа}$ (кгс/см ²)	0,146 (1,49)	0,396 (4,04)	0,374 (3,82)
Частота электропитания $f, \text{ Гц}$	50	50	50
Потребляемая мощность $P_1, \text{ кВт}$	66,4/71,4	13/14	15,7/15,7

КПД $\eta, \%$	26,3/24,4	22,2/20,4	26,1/26,1
$\cos\varphi$	0,355/0,393	0,536/0,504	0,514/0,491
Ток фазный $I, \text{ А}$	292/278	48,4/52	55/56,1
Напряжение фазное $U, \text{ В}$	214/218	166/178	186/190

Примечания: рядом с номинальным значением развиваемого насосом давления (кгс/см²) в скобках указан номинальный расход; для ЦЛИН 4/26 приведены данные номинальных режимов работы при двух значениях температуры натрия; косая черта разделяет опытные и расчетные значения.

Анализ тепловых процессов в ЭМН. Высокая температура перекачиваемых жидких металлов приводит к необходимости использовать жаропрочные проводниковые и электроизоляционные материалы обмоток ЭМН и обеспечивать их допустимые температуры конструктивными решениями, подтверждаемыми расчетным анализом и экспериментальными исследованиями. Результаты тепловых экспериментов [11] для различных ЭМН позволяют оценить допустимые плотности тока в обмотке для различных конструктивных исполнений ЭМН и значений температуры жидкого металла, а также обеспечивают отработку расчетных кодов.

Для расчета температуры обмотки, определяющей срок службы индуктора и, следовательно, всего насоса, используется многофункциональный программный комплекс ANSYS [12], основанный на методе конечных элементов. За расчетную область принимается регулярно повторяющийся элемент индуктора (см. рис. 2 для ЦЛИН) – половина зубцового деления (по середине зубца и катушки), включающий катушку с изоляцией, стальной зубец, ярмо индуктора и медный радиатор. Распределение температуры в расчетной области описывается трехмерным стационарным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + q_V(x, y, z) = 0 \quad (6)$$

где q_V и l – объемное тепловыделение и коэффициент теплопроводности в соответствующей области.

Коэффициент теплопроводности принимался анизотропным внутри катушки (учитывалась изоляция медного провода) и изотропным в других областях. Алгоритм расчета рассмотрим для случая ЭМН с естественным воздушным охлаждением.

Тепло к индуктору поступает от нагретого канала за счет теплопроводности по воздушному зазору (при зазоре 1–2 мм воздух можно считать неподвижным) и излучения. От внешней поверхности индуктора тепло отводится за счет естественной

конвекции и излучения. Боковые поверхности расчетной области считаются теплоизолированными (боковые поверхности фактически являются поверхностями симметрии).

Запишем граничные условия к уравнению теплопроводности (6):

на поверхности индуктора, обращенной к нагретому каналу,

$$-l_i \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{l_B}{d} (T_K - T_i) + q_L; \quad (7)$$

на внешней поверхности индуктора

$$l_i \frac{\partial T}{\partial n_i} = a(T_i - T_{\infty}) + q_L. \quad (8)$$

Индекс i определяет материал поверхности, а значение T_{∞} принимается равным температуре окружающей среды (в помещении). Внешние теплоотдающие поверхности имеют различную ориентацию в пространстве, поэтому в граничном условии (8) производная по температуре берется по n_i (нормаль к поверхности, обращенная внутрь тела). Размер немагнитного зазора d в граничном условии (7) зависит от температуры канала (учитывается его тепловое расширение).

Коэффициент теплоотдачи a определяется по критериальным формулам для теплоотдачи в условиях естественной конвекции [13, 14] с учетом пространственной ориентации поверхностей. Лучистый тепловой поток рассчитывается по известным соотношениям с учетом наличия тепловых экранов между каналом и индуктором.

В качестве рабочего элемента расчетного кода был выбран объемный элемент Solid 90, предназначенный для решения тепловых задач в сложных областях. Это шестигранник, имеющий 20 узлов – 8 на вершинах и 12 на середине сторон. Геометрические размеры отдельных элементов расчетной области существенно различаются (более чем в 100 раз), поэтому сетка строится неравномерной (сгущается в областях с меньшими размерами), что позволяет уменьшить общее число элементов при сохранении точности вычислений.

Основные результаты расчета для двух насосов типа ЦЛИН и сравнение их с экспериментальными данными приведены в табл. 2. Погрешность определения экспериментальных значений температуры не превышает 1,5%. Как видно из таблицы, достигается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных. В целом расчет дает более высокие значения температуры, чем эксперимент. Это связано с тем, что расчет проводился для наиболее тяжелых условий теплообмена (теплоотдающее ребро находилось в нижней части насоса, а степень черноты экранов составляла 0,5).

Кроме того, сложно рассчитать реальные значения коэффициентов теплоотдачи при естественной конвекции в условиях реальной эксплуатации насоса.

Таблица 2

Объект	ЦЛИН 1,5/430 (без экранов)		ЦЛИН 4/26 (с двумя экранами)	
	Значение температуры, °С			
	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет
Натрий	315	315	430	430
Торец радиатора	248	266	172	191
Верх спинки индуктора	258	270	177	200
Катушка (наружный диаметр)	288	300	186	209
Катушка (середина)	293	303	196	221
Катушка (внутренний диаметр)	298	307	222	226

Анализ прочности ЭМН. Наиболее жесткие требования по способности выдерживать механические нагрузки предъявляются к ЭМН для ядерно-энергетических установок. С точки зрения механической прочности канал насоса является наиболее нагруженным и одновременно наиболее ответственным элементом конструкции, так как является границей безопасности. В связи с этим при проектировании основное внимание уделяется прочности канала.

Рассмотрим анализ прочности на примере ЭМН типа ВИН и ЦЛИН. Рабочая часть канала образована наружной цилиндрической оболочкой и оболочкой внутреннего сердечника – гладкой в ЦЛИН и с винтовым шнеком в ВИН. Сердечник представляет собой магнитопровод, размещенный во внутренней оболочке. Канал должен допускать вакуумирование, обеспечивать работу в номинальном режиме при высокой температуре и механических нагрузках со стороны жидкометаллического контура, а также при нарушении нормальных условий эксплуатации, включая воздействие сейсмических нагрузок и т.п.

Расчёт на прочность выполняется в два этапа. На первом выбираются размеры основных элементов и оцениваются допускаемые отдельно действующие нагрузки на патрубки. На втором этапе выполняется поверочный расчёт на прочность с учётом давления в канале, температурного поля: усилия, развиваемого индуктором; усилий предварительного затяга болтов; комбинаций всех сил и

моментов со стороны контура; сейсмических ускорений и др. Процесс согласования допускаемых комбинаций нагрузок может быть итерационным. На стадии поверочного расчета также проверяются условия выполнения «Норм по критериям статической и циклической прочности».

Для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции ЭМН применяются как аналитические методы расчета, так и метод конечных элементов (МКЭ). Например, расчет внутреннего сердечника ЦЛИН и ВИН осуществляется аналитически, а именно: оцениваются прочность и устойчивость его оболочки, прочность ребер и первая собственная частота колебаний. Вопрос об устойчивости возникает в связи с тем, что из-за разности коэффициентов линейного расширения оболочки сердечника и магнитопровода при нагреве между ними образуется радиальный зазор. Если не предпринимать специальных мер, то наружное для сердечника давление в канале может привести к потере устойчивости оболочки сердечника с образованием волн деформации в окружном направлении. Конструктивные меры, препятствующие потере устойчивости оболочки сердечника, и решение соответствующей задачи приведены в [15].

Заключение. Сочетание аналитических и численных методов позволяет проводить инженерные расчеты ЭМН с целью выбора оптимальной геометрии и параметров, обеспечивающих заданную цель оптимизации: максимум КПД, минимум массы и т.д., а также сделать поверочные расчеты выбранного варианта. Как показывает опыт разработки и испытаний ЭМН, предлагаемая методика расчета обеспечивает практические задачи создания ЭМН малой и средней мощности (развиваемого давления до нескольких десятков бар и расходов до нескольких сотен кубических метров в час для щелочных металлов). Для ЭМН большой мощности (с расходом в тысячи, десятки тысяч кубических метров в час) требуются дополнительные расчетно-теоретические исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глухих В.А., Тананаев А.В., Кириллов И.Р. Магнитная гидродинамика в ядерной энергетике. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Штурман Г.И. Индукционные машины с разомкнутым магнитопроводом. — Электричество, 1946, № 10.
3. Лиелпетер Я.Я. Жидкометаллические индукционные МГД-машины. — Рига: Зинатне, 1969.
4. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. — Л.: Энергия, 1970.
5. Охременко Н.М. Основы теории и проектирования линейных индукционных насосов для жидких металлов. — М.: Атомиздат, 1968.
6. Кириллов И.Р. К расчету характеристик индукционных МГД-машин. — Магнитная гидродинамика, 1983, № 1.
7. Кириллов И.Р. Продольный концевой эффект в индукционных цилиндрических МГД-машинах. — Магнитная гидродинамика, 1972, № 2.
8. Кириллов И.Р., Лаврентьев И.В. Интегральные характеристики индукционной МГД-машины с плоским каналом. — Магнитная гидродинамика, 1973, № 2.
9. Кириллов И.Р. Поперечный краевой эффект в индукционных МГД-машинах с винтовым каналом. — Магнитная гидродинамика, 1969, № 4.
10. Кириллов И.Р., Обухов Д.М. Полностью двумерная модель для анализа характеристик линейного цилиндрического индукционного насоса. — ЖТФ, 2005, т. 75, вып. 8.
11. Андреев А.М., Болотова Е.Д., Дивавин В.А., Кириллов И.Р. Исследование температурных режимов индукционных электромагнитных насосов. — Магнитная гидродинамика, 1982, № 2.
12. Чигарев А.В., Крачук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: справочное пособие. — М.: Машиностроение, 2004.
13. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник/ Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина— М.: Энергоатомиздат, 1988.
14. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров/Пер. с англ. — М.: Атомиздат, 1979.
15. А.с. № 1001353 (СССР). Винтовой электромагнитный насос. / И.В. Витковский, А.А. Малков. — БИ, 1983, № 8.

[23.01.13]

А в т о р ы : Витковский Иван Викторович окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ) в 1969 г. Доктор технических наук. Главный научный сотрудник Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры (НИИЭФА) им. Д.В. Ефремова.

Кириллов Игорь Рафаилович окончил электромеханический факультет ЛПИ в 1963 г. Доктор технических наук. Главный научный сотрудник НИИЭФА им. Д.В. Ефремова.

Малков Александр Александрович окончил физико-механический факультет ЛПИ. Кандидат технических наук. Начальник отдела НИИЭФА им. Д.В. Ефремова.

Обухов Денис Михайлович окончил физико-механический факультет Санкт-Петербургского государственного технического университета им. Петра Великого в 2001 г. Кандидат технических наук. Начальник лаборатории НИИЭФА им. Д.В. Ефремова.

Преслицкий Геннадий Венедиктович окончил электромеханический факультет ЛПИ. Кандидат технических наук. Старший научный сотрудник НИИЭФА им. Д.В. Ефремова.

Степанов Вячеслав Васильевич окончил физико-механический факультет ЛПИ. Кандидат технических наук. Доцент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ).

Талалов Виктор Алексеевич окончил физико-механический факультет ЛПИ. Кандидат технических наук. Заведующий кафедрой СПбГУ.