



ВОПРОСЫ ТЕХНИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК В СВЕТЕ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*Сборник статей по материалам
XLV международной научно-практической конференции*

№ 11 (37)
Ноябрь 2021 г.

Издается с августа 2017 года

Новосибирск
2021

УДК 51/53+62
ББК 22+30
В74

Председатель редакционной коллегии:

Ахметов Сайранбек Махсутович – д-р техн. наук, проф., академик Национальной инженерной академии РК и РАЕН, профессор кафедры "Механика" Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, руководитель Казахского отделения (г. Астана) международной научной школы устойчивого развития им. ак. П.Г. Кузнецова.

Редакционная коллегия:

Антифеева Елизавета Львовна – кандидат педагогических наук, доцент, преподаватель кафедры физики Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург;

Ахмеднабиев Расул Магомедович – канд. техн. наук, доц. Полтавского национального технического университета им. Ю. Кондратюка;

Бондарев Андрей Владимирович – канд. техн. наук, зав. кафедрой электроснабжения промышленных предприятий Кумертауского филиала ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Кумертау;

Елисеев Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доцент, бизнес-консультант Академии менеджмента и рынка, ведущий консультант по стратегии и бизнес-процессам, «Консалтинговая фирма «Партнеры и Боровков»;

Каракеян Валерий Иванович – д-р техн. наук, проф. кафедры промышленной экологии Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», г. Зеленоград;

Королев Владимир Степанович – канд. физ.-мат. наук;

Немирова Любовь Федоровна – канд. техн. наук, доц. кафедры конструирования и технологии изделий легкой промышленности, ГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», «Институт дизайна и технологий», г. Омск;

Рымкевич Павел Павлович – д-р техн. наук, канд. физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры физики Военно-космической академии им.А.Ф. Можайского (Санкт-Петербург), член-корреспондент Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы, член Экспертного совета по энергоэффективности зданий и сооружений Санкт-Петербурга.

В74 Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований / Сб. ст. по материалам XLV междунар. науч.-практ. конф. № 11 (37). Новосибирск: Изд. ООО «СибАК», 2021. 94 с.

Учредитель: ООО «СибАК»

Статьи сборника «Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований» размещаются в полнотекстовом формате на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

При перепечатке материалов издания ссылка на сборник статей обязательна.

Оглавление	
Информационные технологии	5
Секция «Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети»	5
ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ДРОБЛЕНИЯ ПАКЕТОВ В ТРАНСПОРТНЫХ ПРОТОКОЛАХ	5
Белов Евгений Александрович	
Секция «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»	10
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ГРУППЫ ПОИСКА ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	10
Новиков Леонид Владимирович	
Шестопалова Ольга Львовна	
ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОЦЕССЕ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ	15
Спандияр Сабинура Муратовна	
Технические науки	19
Секция «Аэрокосмическая техника и технологии»	19
ПОДХОД К СРАВНИТЕЛЬНОМУ АНАЛИЗУ СЛАБОСВЯЗАННОЙ НЕДОРОГОЙ НАВИГАЦИИ СИСТЕМЫ	19
Тасова Мадина Тлеубековна	
Ибраев Айдос Саятулы	
Секция «Информатика, вычислительная техника и управление»	33
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ	33
Ястребов Дмитрий Михайлович	
Шумилов Сергей Сергеевич	

Секция «Материаловедение и металлургическое оборудование и технологии» 42

РАССЫПАЕМОСТЬ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛЮМОКАЛЬЦИЕВОГО ШЛАКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДОБАВЛЕНИЯ КРАСНОГО ШЛАМА 42
Шуйская Вера Сергеевна
Лебедев Андрей Борисович

Секция «Машиностроение и машиноведение» 47

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТОРСКИХ ЗАДАЧ 47
Жуков Евгений Михайлович
Ержонкова Ирина Сергеевна

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ МЖУ С УЧЕТОМ РАЗМЕРОВ ЕГО КОНСТРУКТИВНЫХ ЧАСТЕЙ 54
Маслов Павел Павлович

Секция «Строительство и архитектура» 77

К РАСЧЕТУ СИСТЕМ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ИЗ ВЕНТБЛОКОВ 77
Сибгатуллин Назир Финатович
Сафиуллин Ринат Габдуллович

Секция «Транспорт и связь, кораблестроение» 87

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ДЕТАЛЕЙ 87
Санников Леонид Васильевич

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ МЖУ С УЧЕТОМ РАЗМЕРОВ ЕГО КОНСТРУКТИВНЫХ ЧАСТЕЙ

Маслов Павел Павлович

*канд. техн. наук, директор,
ООО "ИнТек Техно",
РФ, г. Новосибирск*

*E-mail: pavel.maslov@ec-intec.ru
maslov_p@ngs.ru*

АННОТАЦИЯ

В настоящее время вопросы расчета размеров и характеристик МЖУ по заданному конструктиву АЧ и выбранным материалам разработаны достаточно полно. При этом, как правило, в качестве критерия оптимальности принимаются максимальный удерживаемый перепад давления – ΔP_{max} , максимум удерживаемого давления к длине магнитопровода – $\Delta P_{max}/L_m$, определяемые геометрией исключительно АЧ (высота и шаг зубцов, ширина площадки на вершине зубца, угол наклона зубцов, толщина перемычки под пазом магнитопровода, высота магнита, длина магнитопровода и другие). Точность расчета лимитируется, в основном, возможностями вычислительной техники и точностью аппроксимации характеристик ПМ, стали и МЖ. Практически в стороне остаются вопросы расчета размеров магнитопровода, корпуса и МЖУ, в целом, типоразмеров подшипников и уплотнительных колец необходимых для формирования Ведомости покупок изделий.

Введение в расчетную модель дополнительно в качестве фактора наружного диаметра магнитопровода позволяет сравнительно просто определить (при выбранном конструктиве МЖУ) радиальные и осевые размеры магнитопровода и корпуса, размеры ПМ, типоразмеры подшипников и уплотнительных колец и МЖУ, в целом. Точность расчета размеров определяется степенью детализации 3d модели и программы расчета оптимальной геометрии МЖУ. В любом случае это дает возможность:

- Расширения круга рассматриваемых критериев оптимальности, в том числе выбираемых на основе экспертных оценок в виде обобщенных критериев оптимальности с учетом возможности отнесения их к длине, площади или объему элементов МЖУ;
- Расчета, а не задания величины рабочего зазора и его эксцентриситета;

- Выбора стандартных типоразмеров подшипников и колец резиновых уплотнительных в зависимости от выбранного конструктива и размеров по ТЗ;

- Расчета геометрии сечения ПМ в зависимости от выбранного их исполнения (дисковое, кольцевое, трапецидальное, прямоугольное и другие) и размеров сечения магнитопровода.

Учитывая значительное количество работ по оптимизации АЧ МЖУ предлагается программу расчета выполнять в виде двух глобальных подпрограмм. В первой производится расчет и выбор рациональной геометрии АЧ по имеющимся методам и рекомендациям (подпрограмма расчета АЧ) для некоторой совокупности факторов, определяющих геометрию АЧ. Во второй – выбор наружного диаметра магнитопровода и высоты ПМ, обеспечивающих экстремум выбранному критерию оптимальности, при указанной совокупности принятых факторов для расчета АЧ. Здесь же производится выбор и расчет оптимальных элементов геометрии МЖУ, в том числе, и выбор стандартных типоразмеров указанных изделий. В результате, известными методами оптимизации находятся оптимальные значения факторов по указанному подпрограммам, обеспечивающим экстремум принятому критерию оптимальности.

В программе учитываются известные налагаемые ограничения, например, по индукции и/или градиенту индукции в рабочем зазоре и другим, обеспечивающим повышение срока службы МЖ и долговечности МЖУ, в целом. Для этого в программе расчета предусматривается при невыполнении условий любого из принятых ограничений уменьшать коэффициент заполнения кольцевого паза магнитопровода постоянными магнитами (уменьшение числа ПМ).

В свою очередь, уменьшение числа ПМ в кольцевом пазу приводит к увеличению дискретности их расположения в указанном пазу. В работе рассмотрено влияние коэффициента заполнения кольцевого паза на изменение формы замкнутой кривой индукции в РЗ в тангенциальном направлении. В качестве критерия принято отношение удвоенной амплитуды пиков кривой к среднему ее значению. Необходимость перехода к 3d расчетной модели определялась при достижении относительной разницы результатов расчета выбранного критерия оптимальности больше некоторой заданной величины.

Ключевые слова: магнитопровод, кольцевой паз, постоянный магнит, подшипник, расчетная модель, исполнение МЖУ.

Принятые сокращения:

АЧ – Активная часть МЖУ;

КЧ – Конструктивная часть;
 МЖ – Магнитная жидкость;
 МЖУ – Магнитожидкостное уплотнение;
 ПМ – Постоянный магнит;
 РЗ – Рабочий зазор;
 ТЗ – Техническое задание.

В настоящее время существует значительное количество работ по методам расчета оптимальной геометрии собственно АЧ МЖУ. Под активной частью (АЧ) понимается геометрическая область в пределах зубцовой зоны и кольцевого паза магнитопровода в районе переемычки (см. рис.1-4), окружающая РЗ. Из рисунков видно, что АЧ занимает сравнительно малые размеры относительно размеров МЖУ, как по его длине, площади и, особенно, объему и массе. Отсюда вытекают следующие недостатки существующих методов расчета МЖУ:

- Исключение анализа геометрии конструктивных элементов или КЧ МЖУ в расчетной модели (размеры и масса подшипников, уплотнительных колец, крепежа, установочно-присоединительных размеров и массы вала, корпуса и прочих

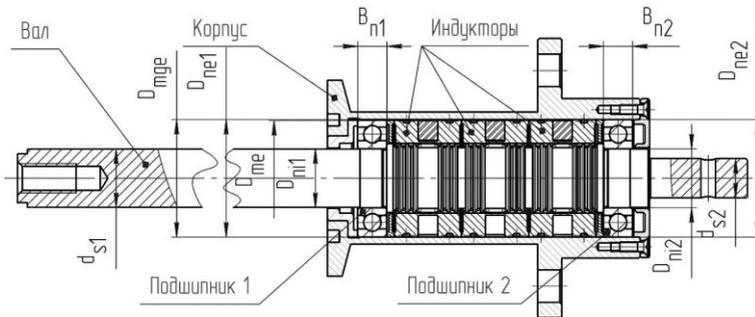


Рисунок 1. Продольное сечение МЖУ с цельным валом и одинаковыми типоразмерами подшипников

деталей (зависят от конструктива МЖУ) приводит к невозможности получения информации о геометрии и массе компонентов и МЖУ в целом. Следует отметить, что указанное исключение может привести и к нерациональному увеличению геометрии собственно АЧ. Из рисунков видно, что геометрия полюсных

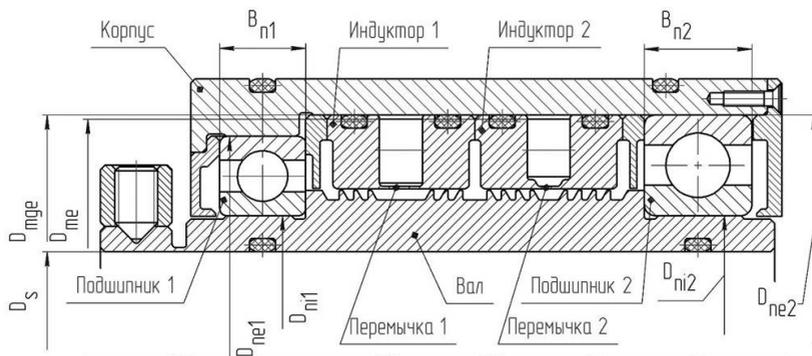


Рисунок 2. Продольное сечение МЖУ с полым валом и разными типоразмерами подшипников

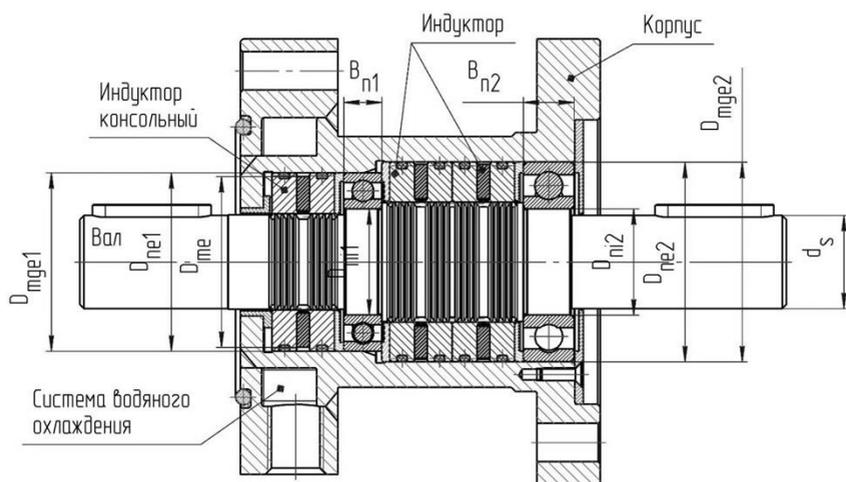


Рисунок 3. Продольное сечение МЖУ с цельным валом, дополнительным консольным индуктором, разными типоразмерами подшипников и рубашкой водяного охлаждения

наконечников магнитопроводов в осевом направлении определяется двумя размерными цепочками: длиной, необходимой для размещения уплотнительного кольца в пазу магнитопровода по его наружному

диаметру и осевым размером по зубцам АЧ (см. условие (8)). Если не выполняется равенство их длин, то

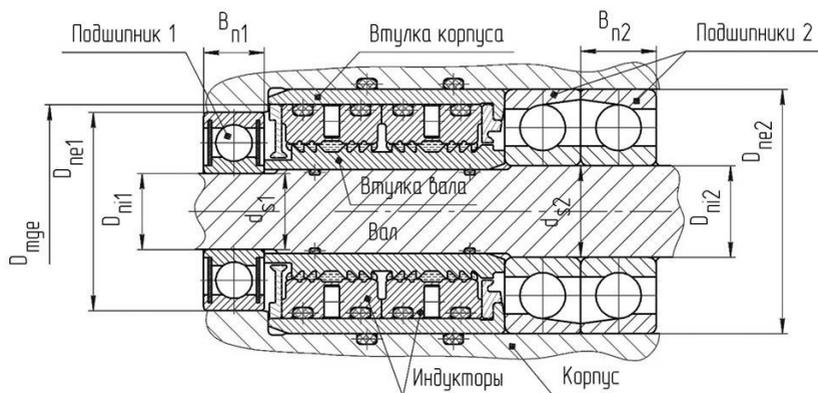


Рисунок 4. Продольное сечение МЖУ с цельным валом, дополнительными втулками на валу и в корпусе и разными типоразмерами подшипников

практически это потребует искусственного удлинения более короткой составляющей;

- Отсутствие информации о размерах конструктивных элементов и их массе не позволяет использовать в качестве критерия оптимальности относительные критерии, отнесенные к их некоторым общим габаритным размерам: длине, площади, или объему (массе) МЖУ.

В качестве примера приведем результаты разработки, изготовления и испытания двух типоразмеров МЖУ, рассчитанных на рабочий перепад давления 1,2 Ати. при диаметре отверстия вала 188 мм. и 340мм. Оптимизация по относительному критерию оптимальности $K_r = \Delta p_{max} / G_{sum} \rightarrow \max$ позволила получить МЖУ общей массой 6,3 кг. и 8,5 кг., соответственно. Здесь

G_{sum} - масса МЖУ, включая массу указанных элементов КЧ, кг.

Следует отметить, что в расчет была введена геометрия тонких радиальных шариковых подшипников KAYDON и подшипников с перекрестными роликами ТНК в первом случае и подшипники FRANKE, во втором. Вместе с тем, учет их размеров и массы стал необходим лишь при переходе к указанному выше относительному критерию оптимальности;

- Одним из важнейших геометрических параметров МЖУ является РЗ. Его расчет [1] основан на учете всех возможных зазоров в посадках: вал-втулка, вал-подшипники, подшипники-корпус, корпус-магнитопровод; отклонений от соосности и радиальных биений посадочных и сопрягаемых (через РЗ) поверхностей. Более того, важную роль играет межосевое расстояние между подшипниками и некоторые другие осевые размеры. Без учета указанных размеров расчет номинального РЗ и эксцентриситета вала невозможен. Это вынуждает задавать их. Причем, как правило, эксцентриситетом пренебрегают.

При учете геометрии АЧ и КЧ МЖУ можно легко определить номинальный РЗ, эксцентриситет и, образуемые эксцентриситетом, минимальный и максимальный зазоры в МЖУ [1, с.33], которые, в свою очередь, позволяют детерминировать процессы оптимизации, используя значение одного из указанных зазоров (минимальный или максимальный). При этом, выбор одного из указанных РЗ определяется принятым критерием оптимальности [2, с.13], [3, с.74], [4, с.139]. Например, при критерии оптимальности – максимуме удерживаемого давления Δp_{max} , необходимо проводить оптимизацию при максимальном РЗ. Именно он определяет минимальное удерживаемое давление МЖУ. И, напротив, если критерием оптимальности является, например, минимум градиента магнитного поля в РЗ – ∇H_{min} , оптимизацию необходимо проводить в области минимального зазора. Именно там градиент поля определяет долговечность работы МЖУ.

Отметим, что предлагаемый способ расчета требует существенно больших объемов памяти ЭВМ для создания баз данных стандартных размеров указанных выше стандартных изделий КЧ, подпрограмм для расчета геометрии и параметров принимаемых вариантов компоновок

Учет связей между элементами геометрии АЧ и КЧ основан на полученных соотношениях (уравнениях и неравенствах), изложенных ниже. При этом указанные соотношения позволяют наиболее полно учесть и ввести в ТЗ исходные размеры и параметры с учетом особенностей исполнения и эксплуатации МЖУ.

Основываясь на ТЗ, выбираем общую компоновку МЖУ (см., например, рис. 1, 2, 3, 4) с учетом удерживаемого перепада давления, температур уплотняемой и окружающей сред, требований по наличию принудительного охлаждения, числа оборотов вала, наличия дополнительных индукторов для отделения подшипника от уплотняемой среды (см. рис.3), коаксиальных валов, значительных осевых и радиальных усилий, заданных исполнений неподвижных уплотнений (резиновые кольца круглого сечения, прокладки плоские из пластмассы или металлические и др.) и исполнения и крепления корпуса и вала МЖУ и

др. Следует отметить, что приведенные компоновочные решения не являются исчерпывающими. Только в базе данных ООО "Интек Техно" г. Новосибирск имеется около сотни компоновок МЖУ с комплектом КД.

Рассмотрим наиболее важные соотношения связей АЧ и КЧ:

1. По размерам концов вала (рис.1, 3, 4) или диаметру отверстия в валу (рис.2), заданных в ТЗ, достаточно просто определить внутренние диаметры подшипников

$$d_{ni1} = d_{s1}(D_s) + 2 \cdot \Delta_{s1} = \text{ц. ч.}, \quad (1a)$$

$$d_{ni2} = d_{s2}(D_s) + 2 \cdot \Delta_{s2} = \text{ц. ч.}, \quad (1б)$$

где Δ_{sk} , ($k = 1,2$)- толщина радиального перехода от заданного по ТЗ диаметра конца вала d_{sk} или диаметра отверстия полого вала D_s , мм.

Очевидно, что d_{ni1} и d_{ni2} должны удовлетворять стандартным значениям для выбранного типоразмера подшипника.

Возможны следующие варианты практической реализации соотношений (1)

1.1. С точки зрения унификации типоразмеров подшипников рационально выбирать подшипники одного типоразмера (см.рис.1), т.е.

$$d_{ni1} = d_{ni2} \text{ и } D_{ne1} = D_{ne2} \quad (1в)$$

К достоинствам варианта следует отнести обработку внутреннего посадочного отверстия корпуса одним диаметром без переходов. Вместе с тем, при единичном производстве унификация комплектующих практически не играет роли из-за отсутствия проблем с их приобретением.

1.2. Радиальные размеры подшипников могут быть выбраны удовлетворяющими соотношениям

$$d_{ni1} = d_{ni2} \text{ и } D_{ne1} \neq D_{ne2} \quad (1г)$$

т.е. подшипники имеют разные наружные диаметры (рис.2,3). Исполнение позволяет упростить разборку МЖУ за счет образования радиальной ступеньки по наружной поверхности системы магнитной. Кроме того, упрощается создание канала в корпусе для организации водяного охлаждения и(или) места для дополнительного консольного индуктора (рис.3).

1.3. В случае неравенства диаметров (см.рис.4)

$$d_{ni1} \neq d_{ni2} \text{ и } D_{ne1} \neq D_{ne2} \quad (1д)$$

упрощается сборка МЖУ с установкой подшипников с одной стороны вала.

2. Для выбранных исполнений подшипников и их внутренних диаметров по каталогам на подшипники, можно выбрать, как правило, несколько типоразмеров с различными наружными диаметрами:

$$D_{ne1} \in \{D_{ne11} \cdot \dots \cdot D_{ne1k} \cdot \dots \cdot D_{ne1i}\} \quad (2а)$$

$$D_{ne2} \in \{D_{ne21} \cdot \dots \cdot D_{ne2p} \cdot \dots \cdot D_{ne2j}\} \quad (2б)$$

где i, j – количество типоразмеров первого и второго подшипников по ГОСТ или ТУ. При этом $1 \leq k \leq i$ и $1 \leq p \leq j$.

Не теряя общности, примем условие

$$D_{ne1k} \leq D_{ne2p} \quad (2в)$$

3. Учитывая (2в), рационально выполнение условия

$$P_1 < P_2 \quad (3)$$

где P_1 и P_2 – абсолютные давления в области подшипников 1 и 2, Па.

Выполнение условия (3) обеспечивает приложение осевого усилия от разницы указанных давлений непосредственно к корпусу МЖУ, а не крышке подшипника через крепящие ее винты. Это особенно актуально при сравнительно больших размерах МЖУ ($D_{mge} > 100$ мм.) и больших перепадах удерживаемых давлений.

4. Диаметр расположения вершин зубцов на валу рационально выбирать из диапазона допустимых диаметров заплечиков вала из соотношений

$$D_{ze} = (d_{a1 \min} \dots d_{a1 \max}) \quad (4а)$$

$$D_{ze} = (d_{a2 \min} \dots d_{a2 \max}), \quad (4б)$$

где $d_{a1 \min}, d_{a1 \max}$ и $d_{a2 \min}, d_{a2 \max}$ минимальные и максимальные диаметры заплечиков по [5] для первого и второго подшипника, соответственно, мм.

Очевидно, решение по (4а) и (4б) существует, если логическое пересечение диапазонов допустимых диаметров заплечиков не равно

нулю (см. рис. 1, 2, 3). В противном случае необходим дополнительный переход на валу для одного заплечика (см. рис.4).

5. Приняв равенство наружных диаметров магнитопровода и подшипника, т.е.

$$D_{mge} = D_{nez}, \quad (5)$$

мы можем определить размеры кольца уплотнительного, паза под него на наружном диаметре магнитопровода и по соотношению (7) минимальную длину магнитопровода L_{m0} при высоте ПМ $H_m = 0$. Это позволяет также предварительно определить количество зубцов АЧ по (8).

6. Максимальный диаметр ПМ для индуктора 1 с перемычкой постоянной толщины по [6, 7] (рис.2 и рис.5, вид Б) может быть рассчитан по соотношению

$$D_{m1} \leq D_{m1 \max} = \frac{D_{mge}}{2} - \left[\frac{D_{ze}}{2} + \delta_p + R_e + H_3 + h_p \right] = \text{ц. ч.} \quad (6a)$$

Для индуктора 2 по (рис.2 и рис.5, вид В) с перемычкой переменной толщины по [8]

$$D_{m2} \leq D_{m2 \max} = \frac{D_{mge}}{2} - \left[\frac{D_{ze}}{2} + \delta_p + R_e + H_y + H_3 + h_p + H_y \right] = \text{ц. ч.} \quad (6b)$$

где δ_p – Рабочий зазор, мм.;

R_e – Группа радиусов сопряжений элементов кольцевого паза магнитопровода, мм.;

H_y – Приращение толщины перемычки у стенки кольцевого паза магнитопровода для индуктора 2 по рис.5, мм.;

$H_3 = (D_{mge} - D_{me})/2 \leq 0,5$ – Радиальный зазор между наружным очерком постоянных магнитов в кольцевом пазу и наружным диаметром магнитопровода, предотвращающий касание магнитами внутренней поверхности корпуса при вводе в него системы магнитной, мм.;

h_p – Толщина перемычки в наиболее тонком месте, мм. При $D_{mge} \leq 100$ мм. принимается $h_p = 0,4$ мм., иначе $h_p = 0,5$ мм.

7. Длина магнитопровода по его наружной поверхности может быть определена по соотношению (см.рис.5)

$$l_m = L_m/D_{mge} = \{H_m + 2 \cdot [C + C_m + B_r + 2 \cdot (R_c + L_{mz})]\}/D_{mge} = h_m + k_l \quad (7)$$

Например, на рис.6 представлены зависимости двух критериев оптимальности от половины высоты магнита H_{mn} . Первый пропорционален отношению удерживаемого давления Δp одним магнитопроводом к осевой длине магнитопровода L_m , второй – абсолютный

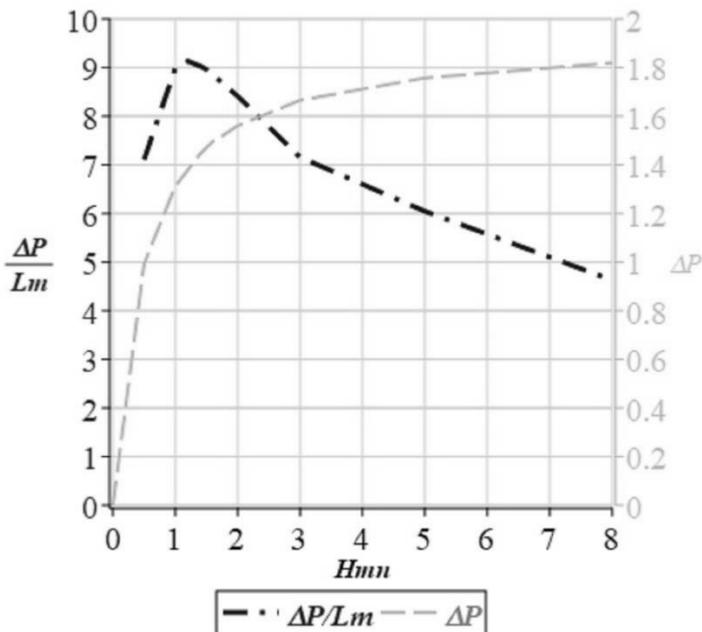


Рисунок 6. Зависимости критериев оптимальности $\Delta P/L_m$ и ΔP от половины высоты магнита H_{mn} .

критерий – пропорционален удерживаемому давлению одним магнитопроводом Δp . Этот рисунок – произвольный срез при некоторой совокупности факторов и параметров и имеет целью обратить внимание на существенное отличие оптимальных значений H_{mn} от рассматриваемого критерия оптимальности и достаточно резко выраженный оптимум одного из них.. Отсюда вытекает необходимость тщательной проверки и оценки выбираемых критериев оптимальности при разработке МЖУ.

8. Число зубцов на валу для индукторов исполнения 1 и 2 (рис.5) может быть выбрано по соотношениям

$$N_{z1} = \frac{[0,5 \cdot (L_m - H_m) - K_c + \delta_p]}{B} = \text{ц. ч.} \geq 1 \text{ (по [6,7])} \quad (8a)$$

$$N_{z2} = N_{z1} + N_{zдоб} = \text{ц. ч.} \geq 1 + N_{zдоб}, \text{ (по [8])} \quad (8б)$$

где (см.рис.5 Б и В): $K_c = L_s + C_i + F$

L_s -длина компенсационного выступа магнитопровода, мм.;

C_i - фаска на внутреннем диаметре магнитопровода, мм.;

F – отступ от фаски до зубца, соответственно, мм.;

$B = \delta_p \cdot (20 \dots 40)$ – рекомендуемый шаг зубцов [2, с.28], [3, с.100], [4, с.154, с.162], [9, с.4], [11, с.93]. Следует отметить, что указанное соотношение предполагается справедливым лишь при оптимизации по следующим критериям оптимальности: максимальному удерживаемому перепаду давления – Δp_{max} или то же, отнесенное к длине магнитопровода $\Delta p_{max}/L_m$, обеспечиваемых геометрией исключительно АЧ. Ранее на указанные критерии были сделаны ссылки на их указание в [2, с.13], [3, с.74], [4, с.139]. Поэтому при расчетах полученные значения B нужно считать как предварительные, требующие уточнения при проведении расчетов.

$N_{zдоб} = 1, 2, 3, \dots$ – Число добавочных зубцов, расположенных под перемычкой по [8].

Из (7) и (8a) видно, что они содержат четыре неизвестных величины: L_m, H_m, N_{z1} и B . Задаваясь рядом значений H_{mj} , в (7) мы можем определить длины магнитопровода L_{mj} . Из (8a) определить произведения $N_{z1} \cdot B$. Учитывая, что $N_{z1i} = 1, 2, 3, \dots = \text{ц. ч.}$, мы можем определить значения B_i , удовлетворяющие (8a). Таким образом, задаваясь рядом значений H_{mj} и N_{z1i} , мы можем определить значения L_{mj} , B_i и по (8б) N_{z2i} .

Для принятого по рис.5 конструктива для расчета геометрии АЧ мы должны принять дополнительные факторы, позволяющие полностью определять геометрию АЧ:

T – Ширина полки зубца, мм.;

$\alpha = 45^\circ$ или 60° – угол наклона стороны зубца относительно полки зубца.

В результате, благодаря использованию информации из ТЗ и сопряжению размеров АЧ и КЧ, количество независимых факторов расчета геометрии АЧ может быть сведено к трем (в данном случае приняты): H_{mj} , N_{z1i} , и T_k , где T_k – ширина полки вершины зубца без учета скруглений полки зубца. В качестве независимых факторов могут быть приняты и другие параметры, приведенные выше.

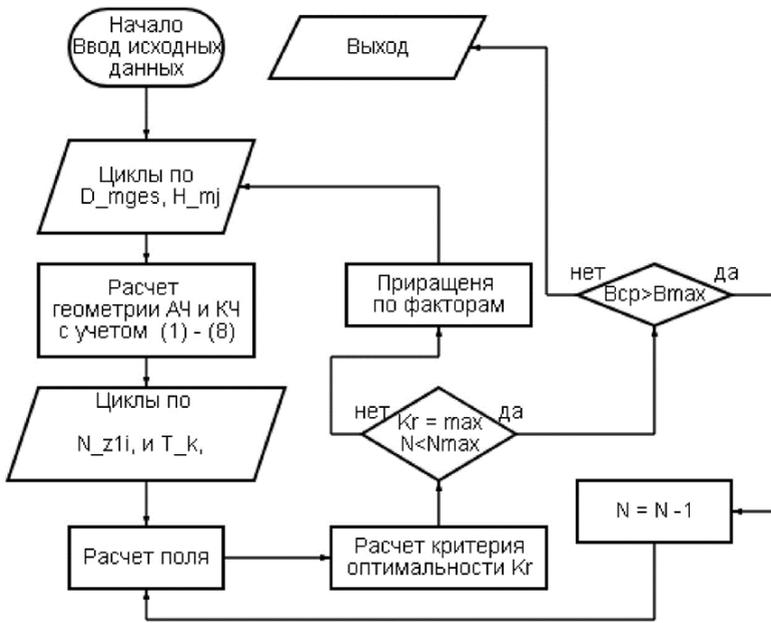


Рисунок 7. Блок-схема расчета оптимальной геометрии АЧ и КЧ МЖУ

На рис.7 представлена укрупненная блок-схема расчета оптимальной геометрии МЖУ, условно разбитая на две подпрограммы. В первой – на основе известных теоретических разработок и экспериментальных данных для выбранных факторов производится расчет геометрии АЧ. Во второй – оптимизируется геометрия АЧ и КЧ по заданному критерию оптимальности. Основные особенности и возможности расчета по представленной схеме:

- В первой подпрограмме в цикле по выбору D_{mges} и H_{mj} для первого фактора предпочтительно ориентироваться на стандартные размеры наружных диаметров подшипников (см. (5)). Если для какого-то типоразмера шаг по стандартным размерам наружных диаметров подшипником слишком велик, можно уменьшить его применением втулок вала и корпуса (см.рис.4). Выбор шага приращения высоты магнитов в цикле менее зависим от соответствующих размеров по нормативным документам. Реально могут быть изготовлены ПМ с

высотой кратной 0,01 мм. Шаг приращения высоты ПМ может быть выбран на указанном уровне;

- Зная текущие D_{mges} и H_{mj} выбираются типоразмер и размеры уплотнительного кольца и паза под него (см.рис.5 А) и по (7) длина магнитопровода L_m ;

- Во второй подпрограмме задаются текущие N_{z1i} , и T_k . Используя их, можно полностью рассчитать геометрию АЧ при принятом угле наклона стороны зубца $\alpha = 45^\circ$ или 60° и построить в графическом редакторе модель АЧ для любого варианта расчетов 2d или 3d.

Таким образом, в рассмотренном общем алгоритме расчета оптимальной геометрии МЖУ (см.рис.7) по выбранному критерию оптимальности учитываются и рассчитываются геометрия и параметры не только АЧ, но и КЧ.

Вместе с тем, программа расчета учитывает и ограничения, накладываемые на геометрию и параметры АЧ и КЧ. В качестве ограничений, применительно к МЖУ, могут выступать ограничения по максимальной, средней или минимальной индукциям в РЗ, максимальные градиенты магнитного поля в РЗ, максимальные размеры и масса МЖУ, максимальные температуры МЖ, максимальные механические напряжения деталей МЖУ и целый ряд других. Также как и критерий оптимальности список ограничений может быть определен методом экспертных оценок. Выполнение же условий, налагаемых ограничениями, предлагается проводить в том числе и варьированием дополнительного фактора – коэффициента заполнения кольцевого паза магнитопровода постоянными магнитами.

Представим указанный коэффициент (для ПМ дисковой формы) в виде

$$K_S = S_m \cdot N / S_n \approx \frac{D_m}{4 \cdot (D_{mge} - D_m)} \cdot N, \quad (9a)$$

$$N \leq N_{\max} \quad (9б)$$

где S_m и S_n – Площадь боковой поверхности постоянного магнита и площадь сопряженной с ПМ торцевой поверхности кольцевого паза магнитопровода, соответственно, мм²;

N – число ПМ в кольцевом пазу магнитопровода;

N_{\max} – максимально возможное число ПМ в кольцевом пазу магнитопровода в зависимости от формы поперечного сечения ПМ [10].

Для иллюстрации рассмотрим организацию поиска оптимальной геометрии МЖУ при ограничении средней индукции в зазоре. Указанное ограничение допустимой величины средней индукции в РЗ

является достаточно распространенным (см. например, [2, с.29], [3, с.74], [11, с.75], [12, с.87]) и может быть выражено в виде

$$B_{\text{ср}} \leq B_{\text{ср доп}} \cong (0.5 \dots 0.7) \quad (10)$$

где $B_{\text{ср доп}}$ – максимально допустимая средняя индукция в РЗ на некотором радиальном расстоянии от гладкой поверхности магнитопровода, Т. В данной работе указанное радиальное расстояние от гладкой поверхности магнитопровода принято 0,0005 мм. при использовании 2d и 3d моделей геометрии АЧ а $B_{\text{ср доп}} = 0,6 \text{ Т}$.

На рис.8 представлены расчетные модели с разными значениями H_{mi} (шаги а, б и в, г) и с перемычкой постоянной и переменной толщины (а, в и б, г). Из рисунка видно, что изменения высоты ПМ приводит к простому смещению зубцовой зоны. При этом геометрия зубцовой зоны не меняется. Это позволяет при изменении H_m просто сдвигать зубцовую зону как одно целое на величину приращения ΔH_m . Изменяется лишь длина перемычки, поэтому на каждом шаге по H_{mj} необходимо рассматривать вопрос о возможности введения дополнительных зубцов под перемычку переменной величины по [8] (см.рис.8 б, г).

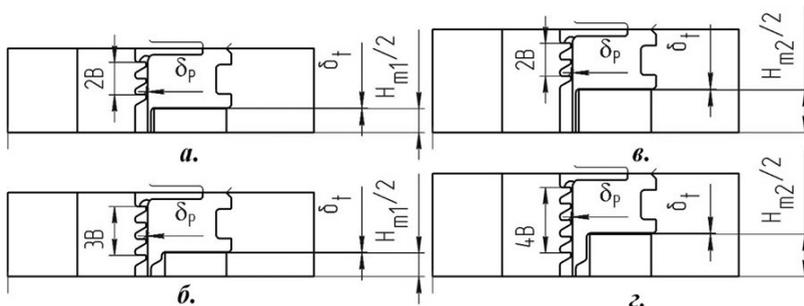


Рисунок 8. Принцип организации геометрии расчетной модели активной зоны МЖУ при варьировании половины высоты ПМ – $H_{mi}/2$. Два варианта с разными полувысотами ПМ: а, в- с постоянной толщиной перемычки фиксированным числом зубцов. б, г- с перемычкой переменной толщины по [8] и переменным числом зубцов

На рисунке также показан учитываемый в расчетах параметр – односторонний технологический зазор между стенкой кольцевого паза и магнитом.

$$\delta_t = (F8_{max} - h7_{min})/2, \quad (11)$$

где $F8_{max}$ и $h7_{min}$ – номинальные допуски на размеры ширины паза магнитопровода и высоты магнита для указанных квалитетов, соответственно, мм.

В работе принято допущение о симметричном положении ПМ в пазу. Это позволяет считать магнитное поле симметричным относительно плоскости симметрии перпендикулярной оси вращения вала и проходящей через середину ПМ и паза и делает возможным провести границу модели по указанной плоскости симметрии, что, в свою очередь, упрощает модель для расчета магнитного поля.

В качестве критерия оптимальности в данной работе принято относительное давление (по аналогии с [3, с.74])

$$K_l = \Delta P / L_m \rightarrow \max \quad (12)$$

где L_m – осевая длина магнитопровода по (7), мм.

В случае дискретного расположения ПМ в кольцевом пазу магнитопровода возникает тангенциальная неоднородность распределения материала ПМ, т.е. нарушается изотропность свойств материала модели. Известно, что магнитопровод, имеющий исполнения по рис.5 (варианты 1 и 2) при прохождении магнитного потока от дискретных ПМ к поверхности магнитопровода, обращенной к РЗ перераспределяет магнитный поток, делает его более равномерным на выходе в РЗ. На рис. 9 а, б, в - в одинаковом масштабе представлены круговые диаграммы распределения индукций в РЗ, а на рис.9г отношения максимальных индукций к минимальным и средние индукции в РЗ от коэффициента заполнения кольцевого паза магнитопровода ПМ по (9а).

Из рис.9г следует, что при уменьшении коэффициента заполнения кольцевого паза магнитопровода ПМ:

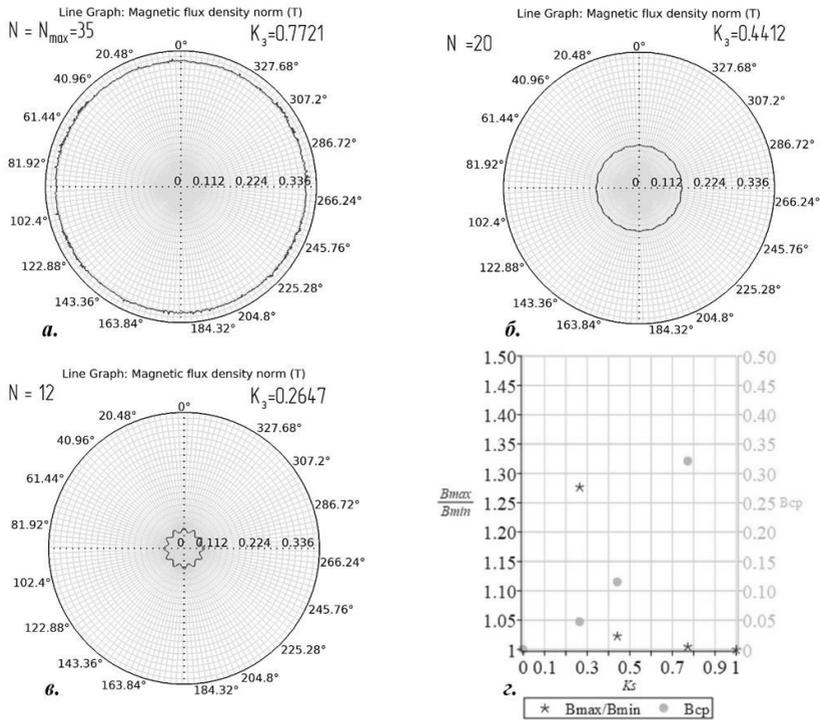


Рисунок 9. а, б, в- круговые диаграммы распределения индукций в РЗ от коэффициента заполнения кольцевого паза магнитопровода ПМ K_3 ; z -отношение максимальной индукции к минимальной B_{max}/B_{min} и средней индукции B_{cp} в РЗ на расстоянии 0,0005 мм. от гладкой поверхности магнитопровода от K_3 при $D_m = 3$ мм., $H_m = 1$ мм., $D_{te} = 38$ мм

- Средняя индукция B_{cp} в РЗ, как и следует ожидать, уменьшается. Причем ее изменение достаточно существенно. Это подтверждает возможность выполнения ограничения (10) путем варьирования указанного коэффициента заполнения (числа ПМ в кольцевом пазу);
- Отношение максимального значения индукции на круговой диаграмме к минимальному возрастает. При этом до значения

$$K_3 \geq 0.4 \tag{13a}$$

это отношение близко к 1, растет сравнительно медленно и для выбранной геометрии АЧ удовлетворяет условию

$$B_{max}/B_{min} \leq 1.03 \quad (136)$$

Малая величина пространственных изменений индукции в РЗ в тангенциальном направлении является необходимым, но недостаточным условием для использования 2d моделей вместо 3d. Необходимо сопоставление результатов расчета по указанным моделям. Ниже, в таблицах 1 и 2 представлены результаты расчета индукций в РЗ при $D_m = 9$ мм., $H_{mn} = 0,5$ мм. и числе. зубцов под одним полюсным наконечником $N_z = 4$. В таблице 1 представлены результаты расчетов при $K_3 = 0,73125$ ($N_{max} = 13$).

Таблица 1. (Индукции в Т.)

Распределение индукции в РЗ

	B_{max1}	B_{max2}	B_{max3}	B_{max4}	$B_{max\ cp}$	$B_{max\ 3d}/B_{max\ 2d}$
3d	0,75400	0,76005	0,77164	0,76631	0,76300	1,00995
2d	0,76055	0,76373	0,75251	0,74512	0,75548	
	B_{min1}	B_{min2}	B_{min3}		$B_{min\ cp}$	$B_{min\ 3d}/B_{max\ 2d}$
3d	0,34197	0,34773	0,35730		0,349	1,01637
2d	0,33856	0,34256	0,34903		0,34338	

То же для $K_3 = 0,50625$ ($N = 9$)

Таблица 2.

Распределение индукции в РЗ

	B_{max1}	B_{max2}	B_{max3}	B_{max4}	$B_{max\ cp3d(2d)}$	$B_{max\ cp\ 3d}/B_{max\ ch2d}$
3	0,5053	0,5100	0,5167	0,5155	0,51189	1,00724
d	0	1	5	1		
2	0,4977	0,5043	0,5136	0,5173	0,50821	1,01693
d	4	7	9	3		
	B_{min1}	B_{min2}	B_{min3}		$B_{min\ cp3d(2d)}$	$B_{min\ cp\ 3d}/B_{min\ cp\ 2d}$
3	0,2431	0,2401	0,2431		0,24211	1,01693
d	1	0	1			
2	0,2341	0,2376	0,2424		0,23808	1,01693
d	9	4	2			

где B_{maxi} и B_{mini} – максимумы и минимумы на кривой распределения индукции под зубцами и пазами на указанном расстоянии от гладкой поверхности магнитопровода в РЗ.

В таблице 3 представлены значения расчетных параметров по (14), взятых из табл. 1, 2.

$$\Delta B_{cp3d(2d)} = B_{max\ cp3d(2d)} - B_{min\ cp3d(2d)} \quad (14a)$$

$$K\Delta B_{cpd} = \Delta B_{cp3d} / \Delta B_{cp2d} \quad (14б)$$

$$B_{cp\ 3d(2d)} = (B_{max\ cp3d(2d)} + B_{min\ cp3d(2d)}) / 2 \quad (14в)$$

$$KB_{cpd} = B_{cp\ 3d} / B_{cp\ 2d} \quad (14г)$$

Таблица 3. (Индукция в Т)

Результаты обработки расчетных параметров из таблиц 1 и 2

K_3	ΔB_{cp3d}	ΔB_{cp2d}	$K\Delta B_{cpd}$	$B_{cp\ 3d}$	$B_{cp\ 2d}$	$KB_{cp\ d}$
0,73125	0.41400	0.41210	1.00461	0.55600	0.54943	1.011196
0,50625	0.26978	0.27013	0.99870	0.37700	0.37313	1.01037

где $\Delta B_{cp3d(2d)}$ – средняя разница изменений индукций между точками максимума и минимума индукции в РЗ в осевом направлении для 3d и 2d моделей. Эти значения пропорциональны удерживаемому давлению в РЗ [2, с.13], [3, с.46], [4, с.12];

$K\Delta B_{cpd}$ – отношение указанных разниц средних индукций, рассчитанных в 3d и 2d моделях;

$B_{cp\ 3d(2d)}$ – среднее значение индукции в указанной плоскости в РЗ для 3d и 2d моделей. Соответствует средней индукции B_{cp} по (10) в выбранной точке.

Из таблиц следует, что в достаточно широком диапазоне варьирования коэффициента заполнения кольцевого паза магнитопровода ПМ K_3 , расчетные значения индукций имеют сравнительно близкие значения под соответствующими зубцами для 3d и 2d моделей (рассогласование не превышает $\pm 1,7\%$). Отсюда и средние значения индукций также практически совпадают (отклонения их отношений от единицы не более $\pm 1,1\%$).

Можно рекомендовать для определения возможности проведения расчетов по 2d модели, вначале провести расчеты по 3d модели для двух значений коэффициента заполнения $K_3 = K_{3\ max}$ (при $N = N_{max}$) в

зависимости от формы сечения ПМ [10] и для значения K_3 по (13а). При допустимом отклонении решений по 3d и 2d моделям оптимизацию можно проводить по 2d моделям в пределах значений $0.4 \leq K_3 \leq K_{3max}$. Если решение выходит за пределы условия (13б), процедуру расчета на 3d модели следует повторить для больших значений K_3 , чем по (13а).

В результате проведенных расчетов оптимальной геометрии МЖУ по принятому критерию оптимальности (12) при $K_3 = K_{3max}$ в соответствии с рис.10а, может быть сделан вывод (для выбранного конструктива МЖУ), что, прежде чем будет достигнут экстремум критерия оптимальности K_l , вступает в силу ограничение по индукции (10). На рис.10а представлены зависимости расчетных

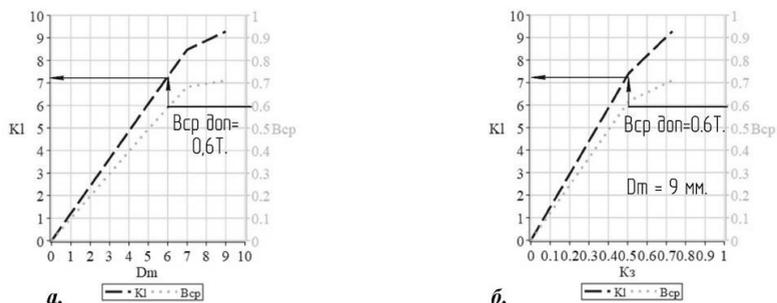


Рисунок 10. Зависимости K_l и V_{cp} от: а- диаметра дискового магнита D_m и б- коэффициента заполнения кольцевого паза магнитопровода ПМ K_3

значений принятого критерия оптимальности K_l по (12) и значения средней индукции в РЗ V_{cp} от диаметра дискового ПМ. Выполняя указанное ограничение, мы должны принять значение диаметра ПМ $D_{mmax} = 6$ мм. При этом значение критерия оптимальности $K_l = 0,72$ Ати/мм. Отсюда, для известного диаметра ПМ по (6а) или (6б) определяем (для конструктива по рис.2 и 5) наружный диаметр магнитопровода $D_{mge} = 42$ мм., внутренние и наружные диаметры подшипников $D_{ni1} = 25$ мм., $D_{ne1} = 37$ мм. и $D_{ni2} = 25$ мм., $D_{ne2} = 42$ мм. и другие размеры АЧ и КЧ МЖУ.

Как правило, расчетная модель МЖУ содержит некоторое количество дополнительных ограничений, касающихся размерных, механических, тепловых и других параметров. При проверке выполнения условий ограничений может возникнуть необходимость корректировки

некоторых размеров КЧ. Например, по условиям повышения долговечности может потребоваться увеличение размеров подшипника с целью обеспечения уровня допустимых нагрузок. Из базы данных находим подшипник с большим наружным диаметром подшипника. С учетом (5) и (6а) или (6б) определяем наружный диаметр магнитопровода D_{mge} и диаметр магнита D_m . В нашем случае $D_{mge} = 48$ мм. и $D_m = 9$ мм. На рис.10а показано, что при диаметре магнита 6 мм. и выше перестает выполняться условие по индукции (10). Для выполнения указанного условия по индукции мы можем варьировать коэффициентом заполнения K_3 . На рис.10б представлены расчетные зависимости K_l и V_{cp} при варьировании K_3 при фиксированном диаметре $D_m = 9$ мм. Из рисунка следует, что допустимый коэффициент заполнения, при котором выполняется условие (10), равен в данном случае $K_3 = 0,506$. Максимальное значение критерия оптимальности при этом $K_l = 0,727$ Ати/мм. Полученный критерий оптимальности даже несколько больше, чем представленный выше при максимальном коэффициенте заполнения кольцевого паза магнитопровода (см. рис.10а).

Из изложенного могут быть сделаны следующие выводы:

- Использование в качестве фактора коэффициента заполнения кольцевого паза магнитопровода позволяет существенно расширить диапазон варьирования других факторов, в частности, например, диаметра ПМ при выполнении условия (10). Требуется более широкое исследование влияния варьирования указанного коэффициента на уровень принятого критерия оптимальности. Действительно, уменьшение количества ПМ в кольцевом пазу позволяет уменьшить объем используемых ПМ и при этом, по крайней мере, сохранить уровень принятого критерия.
- Для рассматриваемого варианта значений факторов с ростом диаметра магнита D_m оптимальная высота магнита уменьшается (см. рис.11). Вместе с тем, стоит отметить, что с ростом D_m уменьшается и число ПМ в пазу магнитопровода [10]. В результате, для вариантов по рис.10а и 10б имеем суммарные объемы ПМ в кольцевом пазу магнитопровода 1720 мм³ и 1260 мм³, соответственно. Т.е. магнитная система с ПМ большего диаметра за счет разрежения ПМ в кольцевом

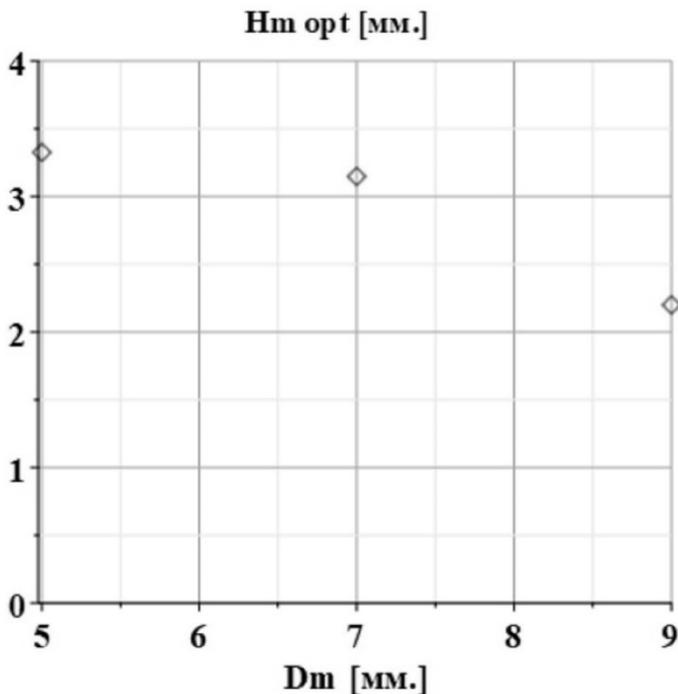


Рисунок 11. Зависимость оптимальной высоты ПМ от диаметра ПМ при обеспечении максимума критерия оптимальности по (12)

пазу магнитопровода и уменьшения их оптимальной высоты (для случая рассматриваемого критерия оптимальности) обеспечивает примерно одинаковое значение критерию оптимальности при объеме ПМ в 1,36 раза меньше.

- При практических разработках МЖУ при оптимизационных расчетах рационально учитывать геометрию не только АЧ, но и КЧ. И хотя это требует создания достаточно большого количества баз данных и подпрограмм расчета составляющих КЧ МЖУ, появляется возможность, во-первых, выбора наиболее рациональных критериев оптимальности, в том числе и относительных, а также выбираемых методом экспертных оценок обобщенных критериев оптимальности. Во-вторых, упрощается последующее проектирование МЖУ за счет расчета геометрии АЧ и КЧ с выдачей требуемых размеров МЖУ в том числе и размеров стандартных изделий.

Список литературы:

1. Маслов П.П. Магнитожидкостные уплотнения. К выбору зазора//Иновации в науке: научный журнал. – №5(93).- Новосибирск, Изд. АНС "Сибак", 2019.-с.25-35.
2. Сайкин М.С. Магнитожидкостные герметизаторы технологического оборудования. СПб.: Лань, 2017.-136с.
3. Магнитные жидкости в машиностроении/ Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин и др. М.: Машиностроение, 1993.-272с.
4. Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Страдомский Ю.И., Перминов С.М. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование/Под общей ред. Ю.Б. Казакова.- ГОУВПО ИГЭУ.-Иваново, 2010.-184с.
5. ГОСТ 20226 Подшипники качения. Запечники для установки подшипников качения Размеры.
6. Helgeland W. Magnetic Fluid Sealing Device // Patent USA № 5826885. 1996.10.02.
7. Михалев Ю.О., Лысенков С.Г. Магнитожидкостное уплотнение // Патент России № 2219400. 2003.20.04. Бюл. № 35.
8. Маслов П.П. Магнитожидкостное уплотнение //Патент России № 2659305. 2018. Бюл. № 13.
9. Перминов С.М. Исследование магнитного поля и удерживающей способности рабочего зазора магнитожидкостного уплотнения с зубцами прямоугольной формы //Вестник ИГЭУ, Иваново.-2014.- вып.1.-с.1- 6.
10. Маслов П.П. Расчет геометрии постоянных магнитов в кольцевом пазу магнитной системы МЖУ// Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: Сб. ст. по материалам XXVIII междунар. науч.-практ. конф.- №6(22).-Новосибирск, Изд. ООО "Сибак", 2020.-с.48-66.
11. Михалев Ю.О., Орлов Д.В., Страдомский Ю.И. Исследование феррожидкостных уплотнений // Магнитная гидродинамика.- 1979.-№3.-с.69-76.
12. Бондарчук В.У., Рахуба В.К., Рекс А.Г., Самойлов В.В. Исследование перепада давлений, удерживаемых магнитожидкостными уплотнениями// Сб. науч. тр.: Проблемы механики магнитных жидкостей.- Минск: ИТМО, 1981.-с.86-109.

Научное издание

**ВОПРОСЫ ТЕХНИЧЕСКИХ
И ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК
В СВЕТЕ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Сборник статей по материалам
XLV международной научно-практической конференции

№ 11 (37)
Ноябрь 2021 г.

Подписано в печать 22.11.21. Формат бумаги 60x84/16.
Бумага офсет №1. Гарнитура Times. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 5,875. Тираж 550 экз.

Издательство ООО «СибАК»
630049, г. Новосибирск, Красный проспект, 165, офис 5.
E-mail: mail@sibac.info

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного
оригинал-макета в типографии «Allprint»
630004, г. Новосибирск, Вокзальная магистраль, 3

16+