

*И.В. Бочкарев, М.Г. Гунина, Д.Н. Садыков, Б. К. Мусабеков,
Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова*

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Предложена методика расчета электромагнитных механизмов, содержащих постоянные магниты для создания тормозного усилия и замыкания фрикционного узла. Методика включает расчет параметров возвратной пружины, с учетом разброса величин тока управляющей обмотки, обусловленного технологическим разбросом параметров постоянного магнита и размеров магнитопровода, нестабильностью напряжения сети, а также изменением сопротивления обмотки вследствие ее нагрева. Показано, что при расчете электромагнитного привода поэтапно решаются две задачи: задача расчета магнитодвижущей силы (МДС), (задача синтеза, или “прямая” задача), и задача расчета магнитных потоков, протекающих по разным участкам магнитной цепи при известных значениях МДС (задача анализа или “обратная” задача). Соответственно, расчет разделен на два этапа: предварительное определение размеров магнитопровода и обмоточных данных и уточненный расчет параметров постоянного магнита с корректировкой геометрических размеров и обмоточных данных управляющего электромагнита.

Ключевые слова: электромагнитный механизм с постоянными магнитами, фрикционный узел, управляющий электромагнит, якорь, возвратная пружина, тормозной момент.

Введение

Развитие современного промышленного производства предполагает широкое использование высокоэффективного оборудования, предназначенного для работы в различных системах автоматического регулирования. Развитие автоматизации обеспечивает повышенную точность выполнения заданных операций, расширение эксплуатационных возможностей и повышение производительности работы. Для обеспечения функционирования такого оборудования необходимо наличие различных технических средств, которые являются основными структурными элементами, влияющим на конструкцию и эксплуатационные возможности любого механизма.

Особое значение на современном этапе развития техники имеет развитие и совершенствование электромеханических элементов автоматизации, как основного звена автоматизации. Основная тенденция их развития заключается в обеспечении высоких технико-экономических показателей, надежности и долговечности при простоте обслуживания и ремонта [1–3].

В состав элементов автоматизации входит обширный класс электромеханических устройств, при помощи которых осуществляется преобразование входного электрического сигнала в механическую энергию на его выходе. Их широкое применение объясняется тем, что при достаточно простой конструкции и компактности они позволяют при малых величинах входного сигнала получить большие силы или моменты на выходе и тем самым без особых затрат осуществить автоматизацию производственного цикла. Следует отметить, что в автоматизированный электропривод, составляющий силовую основу большинства производственного оборудования, входит большое количество различных механических, электрических, электронных и других узлов, которые обеспечивают перемещение рабочего органа с заданными скоростью, точностью и

быстродействием. Очевидно, что силовые электромагнитные механизмы (ЭММ), входящие в состав электромеханической системы, однозначно определяют возможности и характеристики всей системы.

Из всего многообразия ЭММ для дальнейшего исследования выбраны фрикционные муфты и тормоза с электромагнитным дистанционным управлением, содержащие постоянные магниты [4, 5]. В настоящее время такие силовые электромагнитные механизмы с постоянными магнитами (ЭММ ПМ) все более широко используются в электроприводах автоматизированных систем в качестве элементной базы различных автоматизированных электромеханических систем. Такие ЭММ ПМ применяются в станкостроении, робототехнике, авиации и во многих других областях техники. Наряду с автоматизированным оборудованием, которое управляется различными автоматическими системами, в том числе с числовым программным управлением, ЭММ ПМ применяются также и в электроприводах других механизированных машинных агрегатов: в различных силовых установках (например, в силовых электромагнитах, в электроприводах подъемно-транспортных машин и механизмов), в регулирующих устройствах (например, в электромагнитных клапанах) и т.д.

Следует подчеркнуть, что создание ЭММ ПМ, полностью обеспечивающих выполнение предъявляемых к ним эксплуатационных требований, является достаточно сложной инженерной задачей. Это объясняется тем, что в общем случае, ЭММ ПМ являются совмещением трех основных узлов: фрикционного узла, электромагнитного привода, выполненного в виде управляющего электромагнита, и электронной системы управления (СУ), обеспечивающей подачу на обмотку электромагнита знакопостоянного напряжения, изменяющегося по определенному закону.

Следовательно, разработка инженерной методики расчета ЭММ ПМ с заданными эксплуатационными параметрами является важной и актуальной задачей.

Расчет параметров возвратной пружины

В качестве базового варианта выберем конструкцию ЭММ ПМ, показанную на рис. 1. В данном случае ЭММ ПМ используется в режиме фрикционного тормоза.

Тормоз состоит из управляющего электромагнита (УЭ), содержащего обмотку 4, дисковый якорь 5 и магнитопровод, и фрикционного узла, образованного якорем 5 и торцами магнитопровода. Якорь 5 закреплен на упругой мембране 6, которая при помощи цанги 8 устанавливается на валу 7. Упругая мембрана играет роль возвратной пружины. Магнитопровод состоит из наружного 3 и внутреннего 9 полюса и фланца 1, который закреплен на подшипниковом щите 10 электродвигателя. Между фланцем 1 и дисковой частью наружного полюса расположен кольцевой постоянный магнит 2. Фрикционный узел образован торцами полюсов 3, 9 и якорем 5.

При обесточенной обмотке 4 магнитный поток $\Phi_{ПМ}$ постоянного магнита замыкается по цепи «наружный полюс – якорь – внутренний полюс – фланец» и, преодолевая усилие упругого диска, притягивает якорь к полюсам. Таким образом, за счет сил трения вал 7 двигателя заторможен.

При подаче напряжения на обмотку она создает магнитный поток $\Phi_{ЭЛ}$, который направлен встречно потоку $\Phi_{ПМ}$ и вытесняет его из якоря. Под действием силы упругости $F_{ПР}$ мембраны якорь отходит от полюсов и между ними появляется рабочий зазор δ_p (рис. 1), т.е. фрикционный узел размыкается и вал освобождается. Поток $\Phi_{ПМ}$ при этом замыкается по цепи «дисковая часть наружного полюса 3 – внутренний полюс 9 – фланец 1».

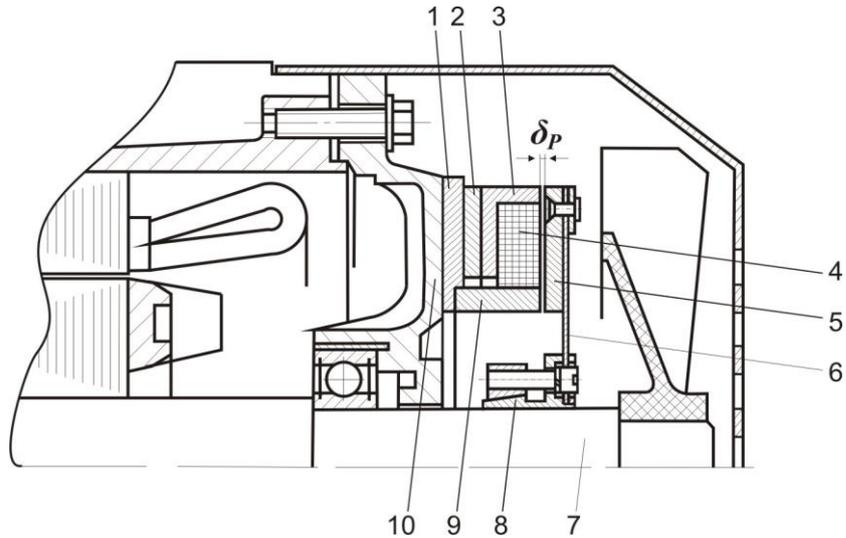


Рисунок 1 – Конструкция активных частей тормозного фрикционного ЭММ ПМ, встроенного в асинхронный двигатель (фрикционный узел показан в разомкнутом положении)

Таким образом, положение якоря относительно полюсов магнитопровода определяет эксплуатационное состояние фрикционного узла ЭММ ПМ, которое зависит от соотношения трех показателей:

- тягового усилия $F_{ПМ}$, создаваемого магнитным потоком $\Phi_{ПМ}$ постоянного магнита;
- тягового усилия $F_{ЭМ}$, создаваемого магнитным потоком $\Phi_{ЭЛ}(i)$ электромагнита;
- силы упругости $F_{ПР}$ возвратной пружины.

Значение суммарного тягового усилия F_T , действующего на якорь, в общем случае равно

$$F_T = F_{ПМ} \pm F_{ЭМ} - F_{ПР}. \quad (1)$$

Изменение усилия F_T от величины тока i УЭ показана на рис. 2.

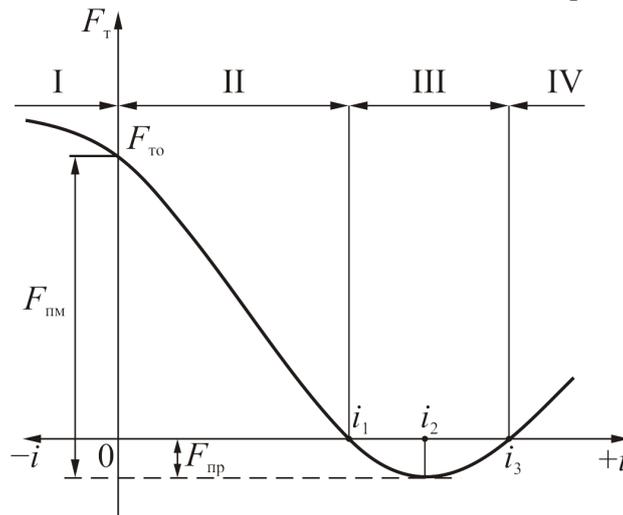


Рисунок 2 – Зависимость тягового усилия F_T от тока i в обмотке управляющего электромагнита

При отключенной обмотке, т.е. при $\Phi_{ЭЛ}(i) = 0$, величина тягового усилия F_T , действующего на якорь, равна $F_{Т0}$

$$F_{TO} = F_{ПМ}(\delta_0) - F_{ПР}(\delta_0), \quad (2)$$

где δ_0 – остаточный эквивалентный воздушный зазор между якорем и полюсами электромагнита.

Значение зазора δ_0 зависит от чистоты обработки сопрягаемых поверхностей якоря и полюсов, а также от качества сборки фрикционного узла.

Разобьем область возможных значений тока i на четыре зоны, причем в зоне I потока $\Phi_{ПМ}$ и $\Phi_{ЭЛ}$ действуют согласно, а в зонах II, III и IV эти потоки действуют встречно:

- в зоне I, когда ток i отрицателен, имеем $F_T > F_{TO}$ и фрикционный узел замкнут;
- в зоне II при $0 < i < i_1$ фрикционный узел продолжает оставаться замкнутым за счет недокомпенсации потока $\Phi_{ПМ}$ потоком $\Phi_{ЭЛ}$;
- в зоне III при $i_1 < i < i_3$ фрикционный узел разомкнут;
- в зоне IV при $i > i_3$ фрикционный узел замкнут за счет перекомпенсации потока $\Phi_{ПМ}$ потоком $\Phi_{ЭЛ}$.

Следовательно, в каждой из указанных зон тяговое усилие F_T , действующее на якорь, равно

$$\left. \begin{aligned} F_T^I(\delta_0, i) &= F_{ПМ}(\delta_0) + F_{ЭМ}(i, \delta_0) - F_{ПР}(\delta_0) \geq 0; \\ F_T^{II}(\delta_0, i) &= F_{ПМ}(\delta_0) - F_{ЭМ}(i, \delta_0) - F_{ПР}(\delta_0) \geq 0; \\ F_T^{III}(\delta_p, i) &= F_{ПМ}(\delta_p) - F_{ЭМ}(i, \delta_p) - F_{ПР}(\delta_p) \leq 0; \\ F_T^{IV}(\delta_0, i) &= F_{ЭМ}(i, \delta_0) - F_{ПМ}(\delta_0) - F_{ПР}(\delta_0) \geq 0; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Таким образом, фрикционный узел разомкнут только в зоне III, причем, как это видно из рис. 2, величина этой зоны определяется величиной силы $F_{ПР}$. Следовательно, фрикционный узел может быть переведен в разомкнутое состояние лишь при величине тока обмотки управляющего электромагнита, значение которого находится в диапазоне $i_1 < i < i_3$. Однако при эксплуатации ЭММ ПМ наблюдается разброс величин тока обмотки, обусловленный следующими причинами:

- технологическим разбросом параметров ПМ и размеров магнитопровода УЭ, что не позволяет гарантировать точное значение потока $\Phi_{ПМ}$;
- нестабильностью напряжения сети;
- изменением сопротивления обмотки вследствие ее нагрева.

Последние две причины приводят к нестабильности магнитного потока $\Phi_{ЭЛ}(i)$.

Получим формулу для расчета требуемой силы упругости F_{np} возвратной пружины с учетом отклонения указанных параметров от их номинальных значений.

В ЭММ ПМ магнитный поток $\Phi_{ЭЛ}$ УЭ изменяется пропорционально его току i , величина которого определяется напряжением питания $U_{НОМ}$ и активным сопротивлением R обмотки. Примем, что максимальное и минимальное значения ожидаемых отклонений напряжения сети от номинального значения $U_{НОМ}$ равны соответственно U_{max} и U_{min} , а сопротивления обмотки в нагретом и холодном состояниях равны $R_{Г}$ и $R_{Х}$.

Тогда предельные отклонения магнитного потока $\Phi_{ЭЛ}$ от его номинального значения $\Phi_{НОМ}$ будут равны:

$$\Phi_{ЭЛ.max} = \Phi_{НОМ} \cdot K_{U.max}; \quad (1)$$

$$\Phi_{ЭЛ.min} = \Phi_{НОМ} \cdot K_{U.min} / K_R, \quad (2)$$

где $K_{U.max} = U_{max} / U_{НОМ}$; $K_{U.min} = U_{min} / U_{НОМ}$; $K_R = R_{Г} / R_{Х}$.

Максимальное $\Phi_{ПМ.max}$ и минимальное $\Phi_{ПМ.min}$ значения магнитного потока постоянного магнита равны:

$$\Phi_{ПМ.max} = \Phi_{НОМ} \cdot K_{ПМ.max}; \quad (3)$$

$$\Phi_{ЭЛ.min} = \Phi_{НОМ} \cdot K_{ПМ.min}, \quad (4)$$

где $K_{ПМ.max}$ и $K_{ПМ.min}$ – коэффициенты разброса параметров ПМ.

Как показал проведенный анализ, значения указанных коэффициентов могут быть приняты равными следующим величинам:

$$K_{ПМ.max} = 1,10 \div 1,15 \text{ и } K_{ПМ.min} = 0,85 \div 0,9; K_{U.max} = 1,1 \text{ и } K_{U.min} = 0,85; K_R = 1,3.$$

При полной компенсации потоков $\Phi_{ЭЛ}$ и $\Phi_{ПМ}$ будет выполняться равенство

$$\Phi_{ЭЛ} = \Phi_{ПМ} = \Phi_{ном}. \quad (5)$$

После подачи напряжения на обмотку УЭ с целью размыкания фрикционного узла, при неполной компенсации указанных потоков в якоре будет оставаться остаточный магнитный поток Φ_0 , который будет продолжать притягивать якорь к полюсам магнитопровода. Для наиболее неблагоприятных сочетаний отклонений вышеуказанных параметров, остаточный поток Φ_0 в будет равен

$$\Phi_0 = \Phi_{ПМ.max} - \Phi_{ЭЛ.min} \text{ или } \Phi_0 = \Phi_{ЭЛ.max} - \Phi_{МП.min}. \quad (6)$$

Т.е. поток постоянного магнита $\Phi_{ПМ}$ в якоре будет, соответственно, или недокомпенсированным, или перекомпенсированным.

Остаточный магнитный поток Φ_0 создаст усилие P_0

$$P_0 = \Phi_0^2 / (\mu \cdot S_n). \quad (7)$$

Усилие P_0 старается удержать якорь электромагнита притянутым к полюсам. Поэтому фрикционный узел разомкнется только в том случае, если усилие $F_{ПР}$ возвратной пружины будет больше усилия P_0 , т.е. при

$$F_{ПР} \geq P_0. \quad (8)$$

Подставляя в (8) выражения (1) ÷ (7), получим

$$F_{ПР} \geq \left(K_{ПМ.max} - \frac{K_{U.min}}{K_R} \right)^2 \cdot \frac{\Phi_{ном}^2}{\mu_0 / S_{II}}; \quad (9)$$

$$F_{ПР} \geq (K_{U.max} - K_{ПМ.min})^2 \cdot \frac{\Phi_{ном}^2}{\mu_0 / S_{II}}.$$

Величина $\Phi_{ном}^2 / (\mu_0 / S_n)$ определяет усилие $F_{ПМ}$, развиваемое постоянным магнитом при отключенной обмотке управляющего электромагнита, то есть при $\Phi_{ЭЛ} = 0$. Выразив $F_{ПМ}$ через усилие $F_{Т0}$, равное при $\Phi_{ЭЛ} = 0$ разности $(F_{ПМ} - F_{нр})$, придадим следующий вид требованиям, предъявляемым к $F_{нр}$:

$$F_{ПР} \geq \frac{F_{Т0} (K_{ПМ.max} - K_{U.min} / K_R)^2}{1 - (K_{ПМ.max} - K_{U.min} / K_R)^2}; \quad (10)$$

$$F_{ПР} \geq \frac{F_{Т0} (K_{U.max} - K_{ПМ.min})^2}{1 - (K_{U.max} - K_{ПМ.min})^2}.$$

Здесь $F_{Т0}$ вычисляют, исходя из требуемого в задании номинального момента трения

$$F_{Т0} = M_{Т.НОМ} / (k_{тр} \cdot R_{ср}), \quad (11)$$

где $R_{ср}$ – средний радиус действия силы трения, который определяется конструкцией и размерами фрикционного узла; $k_{тр}$ – коэффициент трения.

Расчет электромагнитного привода ЭММ ПМ

Расчет электромагнитного привода ЭММ ПМ целесообразно разделить на два этапа:

– поисковый расчет, заключающийся в предварительном определении размеров магнитопровода и обмоточных данных обмотки УЭ, а также силы упругости возвратной пружины, способных обеспечить требуемые по техническому заданию выходные параметры;

– уточненный расчет, заключающийся в определении параметров постоянного

магнита и корректировке геометрических размеров и обмоточных данных УЭ.

Эскиз магнитной системы фрикционных ЭММ ПМ показан на рис. 3.

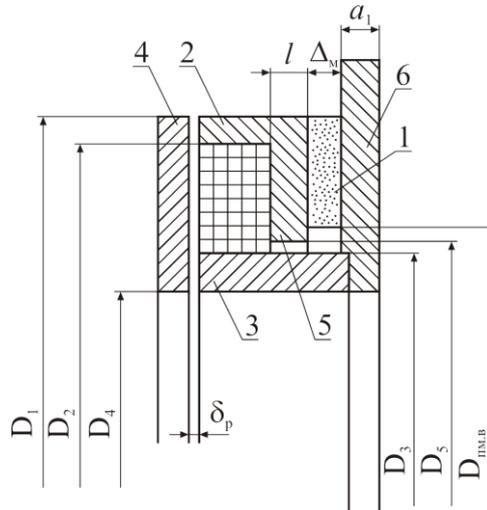


Рисунок 3 – Эскиз магнитной системы фрикционных ЭММ ПМ

В сущности, выполняется расчет разветвленной магнитной цепи УЭ и указанные этапы расчета решают две задачи:

- задача расчета магнитодвижущей силы (МДС), которая необходима для создания требуемой величины магнитной индукции (задача синтеза или “прямая” задача);
- задача расчета магнитных потоков, протекающих по разным участкам магнитной цепи при известных значениях МДС (задача анализа или “обратная” задача) [6, 7].

Поисковый расчет. При изготовлении ЭММ ПМ технологически невозможно намагничивать постоянные магниты уже в собранной магнитной системе. Поэтому целесообразно использовать металлокерамические ферритбариевые магниты, например, марки 24 БА210, которые при изменении внешних условий размагничиваются несущественно [8]. Такие магниты имеют большую коэрцитивную силу H_c и малую остаточную индукцию B_r [9], за счет чего увеличение их осевого размера мало влияет на значение $\Phi_{ПМ}$. Анализ известных ЭММ ПМ показал, что толщина магнита обычно составляет $\Delta_m = 5 \div 6$ мм (рис. 3).

Поскольку магниты данной группы имеют низкую индукцию в нейтральном сечении, то для улучшения показателей ЭММ ПМ используют эффект «трансформации» магнитной индукции [10], который состоит в следующем.

Индукции на полюсе магнита $B_{ПМ}$ и на полюсе магнитопровода $B_{П}$ соответственно равны

$$B_{ПМ} = \Phi_{ПМ} / S_m; \quad B_{П} = \Phi_{ПМ} / S_n, \quad (12)$$

где S_m и S_n - площади полюса постоянного магнита и магнитопровода.

Из этих выражений следует, что

$$B_{П} = B_{ПМ} / S_n. \quad (13)$$

Таким образом, выполнив условие $S_n < S_m$, обеспечивают $B_{П} > B_{ПМ}$. Этот эффект и называют «трансформация индукции».

Очевидно, что диаметральные размеры магнитопровода УЭ зависят от размеров электродвигателя, для которого предназначен проектируемый тормоз. Из рис. 2.1 следует, что диаметр D_1 надо вычислять с учетом высоты оси вращения двигателя $h_{вр}$, а диаметр D_4 – с учетом наружного диаметра подшипникового узла $D_{пш}$. Это обеспечит возможность встраивания тормоза в электродвигатель. При этом для удобства определения D_4 в инженерных расчетах проще ориентироваться на наружный диаметр под-

шипника $D_{нод}$.

Анализ показал, величины D_1 и D_4 можно связать с размерами $h_{ер}$ и $D_{нод}$ следующими зависимостями:

$$D_1 = (1,3 \div 1,5) h_{ер}; D_4 = (1,2 \div 1,6) D_{нод}. \quad (14)$$

Величину δ_0 при расчете может быть принято $\delta_0 = 0,05 \div 0,15$ мм. Поскольку фрикционные поверхности якоря и полюсов при работе тормоза стираются и тем самым воздушный рабочий зазор δ_p в процессе эксплуатации изменяется, то расчет зазора δ_p надо вести по конечному допустимому значению. Как показал анализ, эта величина обычно составляет $\delta_p \leq 1 \div 2$ мм.

Зазор δ_δ между цилиндрической частью наружного полюса 3 и внутренним полюсом 9 (рис. 1) следует выбирать с учетом величины δ_p . Получено, что его наиболее целесообразно выбирать в пределах $\delta_\delta = (4 \div 5) \delta_p$.

После выбора значений $\Delta_M, D_1, D_4, \delta_0, \delta_p, \delta_\delta$ и вычисления $F_{ПР}$ и $F_{Т0}$ по (10) и (11) с учетом требуемой величины момента трения $M_{тр}$ предварительный расчет проводится в следующей последовательности.

В соответствии с рис. 2 вычисляют требуемое тяговое усилие $F_{ПМ}$, которое должен обеспечить постоянный магнит

$$F_{ПМ} = F_{Т0} + F_{нр} \quad (15)$$

Затем выбирают по условиям обеспечения оптимального насыщения допустимую индукцию $B_{n.дон}$ в магнитопроводе и рассчитывают диаметральные размеры магнитопровода:

$$D_2 = \sqrt{D_1^2 - 4/(\pi \cdot S_n)}; D_3 = \sqrt{D_4^2 + 4/(\pi \cdot S_n)}, \quad (16)$$

где $S_n = \mu_0 F_{ПМ} / B_{n.дон}^2$.

Требуемая площадь $S_{ПМ}$ полюса постоянного магнита с учетом коэффициента рассеяния σ_p его магнитного потока определяется:

$$S_{ПМ} = \frac{B_n}{B_m} S_n \sigma_p, \quad (17)$$

где значение индукции B_m принимаем для случая, когда рабочая точка постоянного магнита находится на пересечении наиболее неблагоприятной прямой возврата с осью ординат (зависит от материала магнита).

Значение σ_p для выбранной конструктивной схемы тормоза, как показал анализ магнитных систем электромагнитных устройств с постоянными магнитами, целесообразно выбрать равным $\sigma_p = 1,2 \div 1,4$.

Для определения осевых размеров магнитопровода необходимо определить размеры обмотки электромагнита. Средний диаметр обмотки $D_{ср}$ и ширина паза под обмотку b вычисляются по следующим формулам:

- ширина паза под обмотку

$$b = (D_2 - D_3) / 2. \quad (18)$$

- величина среднего диаметра обмотки:

$$D_{ср} = (D_2 + D_3) / 2. \quad (19)$$

Толщину якоря $h_я$ и высоту спинки магнитопровода h_c необходимо обеспечить такими, чтобы эти участки магнитной цепи не насыщались. Поскольку их максимальное насыщение будет там, где в них входит поток из внутреннего полюса, то в этом месте сечения якоря $S_я$ и спинки S_c должны быть равны сечению S_n . Тогда имеем

$$h_я = h_c = \frac{S_n}{\pi \cdot D_3}. \quad (20)$$

Число витков обмотки УЭ

$$W = U / (\rho \cdot j \cdot \pi \cdot D_{ср}) \quad (21)$$

Пренебрегая магнитным сопротивлением магнитопровода, МДС F обмотки равна:

$$F = (F_{\delta 0} + F_{\delta d}) / \sigma_{p0}, \quad (22)$$

где $F_{\delta 0} = 2 \cdot \delta_0 \cdot B_n / \mu_0$ – МДС воздушного зазора при притянутом якоре; $F_{\delta d} = \delta_d \cdot B_n / \mu_0$ – МДС воздушного зазора под цилиндрической частью наружного полюса; $\sigma_{p0} = 2 \div 2,5$ – коэффициент, учитывающий рассеяние магнитного потока обмотки.

По величине F , вычисляем значение тока i и сечение провода S_{np} :

$$i = F/W; \quad S_{np} = i/j. \quad (23)$$

Тогда предварительное значение диаметра провода обмотки можно определить по формуле

$$d'_{np} = \sqrt{4 \cdot S_{np} / \pi} \quad (24)$$

По величине d'_{np} выбирают ближайший стандартный провод, определяя тем самым $d_{np.ст}$ и $S_{np.ст}$.

Глубина паза под обмотку

$$h = \frac{W \cdot S_{np.ст}}{b \cdot k_3}, \quad (25)$$

где k_3 – коэффициент заполнения паза обмоткой.

Тогда общая высота магнитопровода будет равна

$$H = h_c + h, \quad (26)$$

Толщину добавочного полюса 5 и фланца 6 (см. рис. 2.2) определяем по допустимой индукции в них. Для этого рассчитываем магнитный поток постоянного магнита:

$$\Phi_{ПМ} = B_{ПМ} S_n. \quad (27)$$

Тогда толщина дополнительного полюса будет равна:

$$l = \Phi_{ПМ} / (\pi D_{ПМ.в} B_{дон} \sigma_p), \quad (28)$$

а толщина фланца

$$a_1 = \Phi_{ПМ} / (\pi D_3 B_{дон} \sigma_p) \quad (29)$$

Таким образом, все предварительные геометрические размеры и обмоточные данные электромагнитного привода определены.

Далее необходимо оценить работоспособность спроектированного УЭ по нагреву его обмотки. Для этого определяют потребляемую мощность, теплоотдающую поверхность и перегрев обмотки Δt^0 .

Уточненный расчет заключается в определении фактических магнитных параметров постоянного магнита, которые он имеет при различном положении якоря относительно магнитопровода, т.е. при различных рабочих состояниях фрикционного узла. Это позволит определить реальные выходные параметры ЭММ ПМ и при необходимости провести корректировку геометрических размеров магнитопровода и постоянного магнита, а также обмоточных данных УЭ. Поскольку магнитные свойства магнитопровода нелинейны, а магнитные свойства постоянного магнита в значительной мере зависят от технологии его изготовления и конкретных условий намагничивания, то точное аналитическое решение поставленной задачи практически весьма затруднительно. Поэтому расчет выполняют по упрощенным методикам. Такие методики для инженерных расчетов вполне приемлемы, поскольку погрешность при их использовании приблизительно совпадает с точностью воспроизведения собственных свойств постоянных магнитов.

При расчетах ЭММ ПМ наиболее целесообразно применить метод отношений, используемый для постоянных магнитов, расположенных в магнитной арматуре. В соответствии с этим методом принимают, что магнитное сопротивление арматуры равно нулю, а магнитное напряжение вдоль магнита распределено линейно [8].

Для расчета рабочей точки постоянного магнита используют усредненную кривую намагничивания $B = f(H)$ для соответствующего материала магнита. При этом

наиболее трудоемким этапом расчета является определение проводимостей, причем в этом случае, наряду с определением проводимостей рассеяния магнитопровода, необходимо учитывать и проводимости рассеяния самого постоянного магнита. Формулы для расчета соответствующих проводимостей могут быть получены по методу «вероятных путей потока» заменой действительного распределения поля приближенным упрощенным распределением [8, 9]. Таким образом, полную расчетную проводимость можно представить в виде трех составляющих:

$$\lambda = \lambda_{\delta} + \lambda_{p.m} + k_{ПМ} \lambda_{p.ПМ}, \quad (30)$$

где λ_{δ} , $\lambda_{p.m}$ и $\lambda_{p.ПМ}$ – проводимости воздушного зазора, рассеяния магнитопровода и рассеяния магнита; $k_{ПМ} = 1/2 \div 2/3$ коэффициент неравномерности распределения магнитного потенциала вдоль магнита.

Значение λ зависит от положения якоря относительно магнитопровода. Координаты рабочей точки постоянного магнита, то есть индукции $B_{ПМ}$ и напряженности $H_{ПМ}$ в нейтральном сечении постоянного магнита, удобнее всего определять графически. При этом необходимо учитывать способ намагничивания магнита, который будет использоваться в процессе изготовления ЭММ ПМ. При установке магнита в магнитопровод проводимость увеличивается и становится равной λ , за счет чего параметры магнита изменяются, и их значения будут определяться точкой пересечения линии возврата, проведенной из начала координат под углом α [11].

При изменении величины λ вследствие изменения положения якоря, рабочая точка магнита будет перемещаться по линии возврата и определяться точкой пересечения линии возврата и прямой, проведенной из начала координат под углом, соответствующем суммарной проводимости при соответствующем положении якоря относительно магнитопровода. Эти расчетно-графические процедуры выполняются следующим образом. На графике кривой размагничивания постоянного магнита из начала координат проводим прямую (рис. 4) под углом α_1 (показана кривая размагничивания ферритбариевого магнита марки 24 БА210)

$$\alpha_1 = \arctg (G_{np} \cdot m), \quad (31)$$

где G_{np} – приведенная проводимость при отсутствии якоря; $m = m_n / m_e$ – коэффициент пропорциональности; m_n и m_e – масштабы напряженности и индукции соответственно.

Точка пересечения K указанной прямой линии с кривой размагничивания дает значение индукции и напряженности магнитного поля в нейтральном сечении магнита при отсутствии якоря.

5. Находим наклон прямой возврата KS :

$$\varphi = \arctg \left[\frac{B_r}{H_c} (1 - K)^m \right], \quad (32)$$

где $K = 2 \sqrt{\frac{B_r H_c}{B_0 H_0}} - \frac{B_r H_c}{B_0 H_0}$; B_r – остаточная индукция; H_c – коэрцитивная сила.

На графике кривой размагничивания из начала координат проводим прямую под углом α_2 :

$$\alpha_2 = \arctg (G_{np.з} \cdot m), \quad (33)$$

где $G_{np.з} = G_{об.з} \cdot \Delta_m / S_m$ – приведенное значение проводимости при замкнутом тормозе.

Точка пересечения L этой прямой линии с прямой возврата дает значение индукции $B_з$ и напряженности $H_з$ магнитного поля в нейтральном сечении магнита при замкнутом тормозе.

Затем проводим прямую линию под углом α_3

$$\alpha_3 = \arctg (G_{np.раз} \cdot m). \quad (34)$$

Точка пересечения M этой линии с прямой возврата дает значение индукции $B_{раз}$

и напряженности $H_{раз}$ при разомкнутом тормозе.

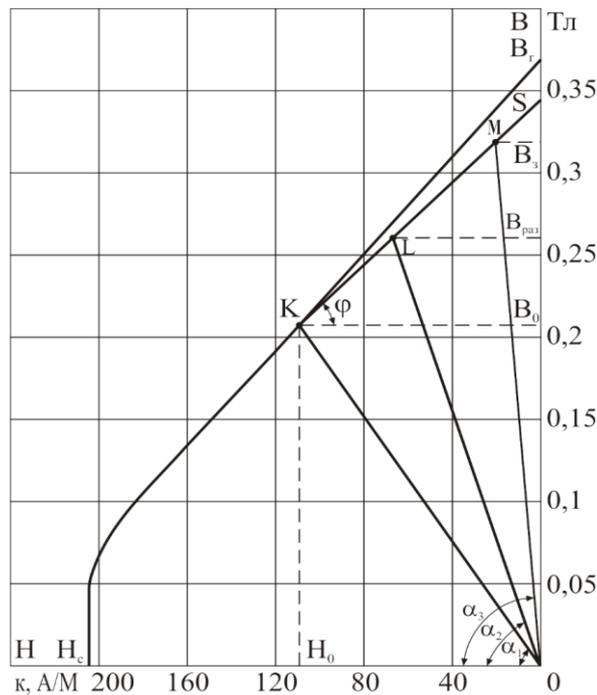


Рисунок 4 – Определение рабочих точек постоянного магнита

Определив параметры постоянного магнита, определяют выходные показатели ЭММ ПМ. Например, номинальный тормозной момент, развиваемый тормозом при замкнутом фрикционном узле, можно вычислить по выражению:

$$M_{T.ном} = (B_3^2 S_n / \mu_0 - F_{np}) k_{mp} R_{cp} \cdot \quad (35)$$

Для оценки работоспособности спроектированного тормоза необходимо решить обратную задачу расчета магнитной цепи. Для этого необходимо задаемся произвольными величинами магнитного потока Φ и для каждого значения потока выполнить следующие расчетно-графические процедуры:

- а) рассчитать индукцию $B = \Phi / S_n$;
- б) определить по кривой намагничивания величину напряженности магнитного поля в магнитопроводе H_m ;
- в) рассчитать разность магнитных потенциалов по различным путям замыкания магнитного потока:
 - по ветви, содержащей якорь и δ_p (при разомкнутом тормозе);
 - по ветви, содержащей зазор между внутренним полюсом и цилиндрической частью наружного полюса;
 - по ветви, содержащей постоянный магнит;
 - по ветви, содержащей якорь и δ_0 (при замкнутом тормозе).
- г) графически определить магнитные потоки в зазоре между якорем и магнитопроводом, создаваемые обмоткой при рабочем токе при двух положениях якоря – при $\delta = \delta_p$ и $\delta = \delta_0$.

После этого можно объективно определить рабочие параметры тормоза и оценить его работоспособность. Если значения выходных показателей отличаются от требуемых по техническому заданию, то необходимо откорректировать геометрические размеры и обмоточные данные электромагнитного привода.

Заключение

Разработана инженерная методика расчета электромагнитных механизмов, содержащих постоянные магниты, магнитный поток которых используется для создания тормозного усилия и замыкания фрикционного узла. Основой методики является расчет параметров возвратной пружины, учитывающий целый ряд технологических и эксплуатационных причин разброса тока управляющей обмотки в реальных условиях изготовления и эксплуатации ЭММ ПМ. Предложенный алгоритм двухступенчатого расчета позволяет проектировать ЭММ ПМ с заданными параметрами и гарантированной надежностью работы.

Следует подчеркнуть, что разработанная методика расчета применима не только для расчета ЭММ ПМ, работающих в режиме фрикционного управляемого тормоза, но и для целого ряда других устройств, например, электромагнитных муфт, регулирующих устройств в виде электромагнитных клапанов, блокирующих устройств, станочных приспособлений различных типов, в которых используются постоянные магниты в качестве крепежных средств для обрабатываемых деталей и т.д.

Литература

1. Шишмарев В. Ю. Типовые элементы систем автоматического управления. – М.: Академия, 2004. – 304 с.
2. Михеев В. П., Выжимов В. И. Исполнительные устройства автоматических систем. – М., МИФИ, 2008. – 332 с.
3. Бочкарев И. В., Галбаев Ж. Т. Исследование надежности фрикционных электромагнитных устройств для систем автоматизации // Проблемы автоматизации и управления. 2008. – С. 180–186.
4. Бочкарев И. В. Разработка электромеханических тормозов с постоянными магнитами с улучшенными удельными показателями // Электротехника, 1998, №4. – С. 37 – 39.
5. Бочкарев И. В., Галбаев Ж. Т. Разработка и исследование устройства контроля состояния фрикционных электромеханических устройств с постоянными магнитами // Проблемы автоматизации и управления. – 2015, № 1 (28). – С.237–242.
6. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учеб. для вузов. – М.: Гардарика, 2002. – 638 с.
8. Арнольд Р. Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. М.: Энергия. 1969. – 184 с.
9. Постоянные магниты: Справочник / Альтман А. Б., Герберг А. Н., Гладышев П. А. и др.; Под ред. Ю. М. Пятина. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
10. Константинов О. Я. Магнитная технологическая оснастка. – Л.: Машиностроение, 1974. – 384 с.
11. Сливинская А. Г. Электромагниты и постоянные магниты. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.