



УДК 62-592.117: 621.313.13

## УСТОЙЧИВОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЯМ ВНЕШНИХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

ГАЛБАЕВ Ж.Т.

КГТУ им.И.Раззакова  
[izvestiya@ktu.aknet.kg](mailto:izvestiya@ktu.aknet.kg)

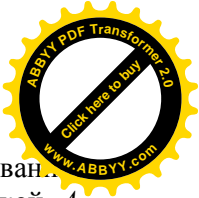
*Рассмотрены вопросы влияния внешних условий на стабильность параметров постоянных магнитов электромагнитных механизмов*  
*Questions of influence of external conditions on stability of parameters of constant magnets of electromagnetic mechanisms are considered*

**Введение.** Современный научно-технический прогресс требует ускорения темпов обновления технических средств и технологических процессов, широкого внедрения средств автоматизации и механизации. Особенно интенсивно ускоряются темпы обновления элементов и устройств систем управления, среди которых значительное место занимают силовые электромагнитные механизмы с постоянными магнитами (ЭММ ПМ) в виде фрикционных муфт и тормозов с электромагнитным приводом. Такие ЭММ ПМ широко используются в различных робототехнических и мехатронных системах, в том числе и в автоматизированных системах бортового электрооборудования летательных аппаратов. Очевидно, что технический уровень и эксплуатационные показатели этого оборудования однозначно определяются параметрами и характеристиками ЭММ ПМ, входящими в их электромеханические системы.

Как показано в [1, 2], в ЭММ ПМ применяют различные типы магнитов: металлокерамические магниты, получаемые методами порошковой металлургии; литые магниты на основе сплава железа, никеля и алюминия, или железа, никеля, алюминия и кобальта; магниты из сплавов на основе редкоземельных металлов. При выборе наиболее оптимального типа материала [2] необходимо одновременно учитывать не только энергоёмкость материала, вид кривой намагничивания, величину коэрцитивной силы и остаточной индукции, наличие в его составе дефицитных компонентов и т.д., но и требования стабильности выходных параметров ЭММ ПМ, которая зависит от стабильности магнитных параметров ПМ.

**Цель исследования.** В электромагнитных устройствах магнитное поле постоянного магнита используется для создания усилия между соответствующими конструктивными элементами, а обмотка управляющего электромагнита создает магнитное поле, направленное встречно полю ПМ, которое служит или для компенсации этого поля, или для его вытеснения из рабочей зоны [1]. Для улучшения эксплуатационных свойств электропривода, содержащего электромагнитные муфты с ПМ, был разработан новый способ управления [3,4]. Он основан на том, что в момент пуска электропривода напряжение дополнительно подается на обмотку электромагнитной муфты, причем полярность этого напряжения такова, что создаваемый обмоткой магнитный поток направлен согласно магнитному потоку постоянного магнита. За счет этого при пуске муфта замкнута совместным усилием, создаваемым магнитными полями постоянного магнита и обмотки, что исключает возможность проскальзывания полумуфт муфты и обеспечивает надежный и быстрый разгон приводного механизма при снижении габаритов постоянного магнита и обмотки.

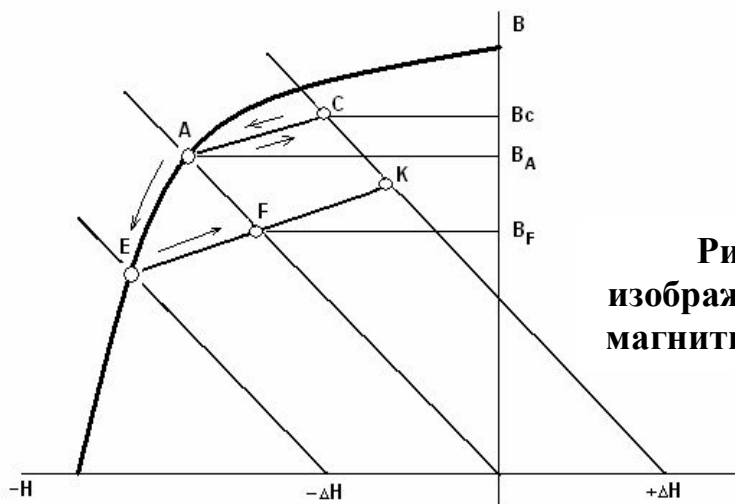
Таким образом, в общем случае на постоянный магнит в ЭММ ПМ может воздействовать как согласное, так и встречное внешнее магнитное поле. Поэтому представляет значительный практический интерес вопрос стабильности параметров ПМ при таком воздействии. При этом необходимо иметь в виду, что магнитная нестабильность, как обратимая, так и необратимая, зависит не только от свойств самого материала и конструкции конкретной магнитной системы, но также и от условий её эксплуатации. Например, при использовании ЭММ ПМ в системах бортового электрооборудования летательных аппаратов температура может изменяться в весьма широком диапазоне как следствие изменения внешних условий.



**Результаты исследований.** Рассмотрим изменение магнитных параметров, вызванное воздействием возмущающего поля  $\pm \Delta H$  на систему, характеризующуюся рабочей точкой  $A$ , которой соответствует магнитная индукция  $B_a$  (рис. 1). Влияние других факторов (механических напряжений, изменения магнитного сопротивления цепи и т. п.) можно рассматривать аналогичным образом, пользуясь понятием эквивалентного поля  $\Delta H$ . При этом следует подчеркнуть, что магнитное состояние любого стабилизированного магнита определяется не характеристикой намагничивания, а характеристикой магнитного возврата и что знание этой характеристики необходимо при расчете ЭММ ПМ, в которых магнитный поток обратимо изменяется в процессе работы.

При действии поля  $+\Delta H$  (подмагничивающее поле для рассматриваемой магнитной системы) изменение магнитного состояния произойдет по прямой возврата  $AC$  и магнитная индукция изменится до  $B_c$ . После снятия поля магнитное состояние изменится практически по прямой  $CA$  и индукция возвратится к исходному значению  $B_a$ , т. е. изменение индукции будет обратимым [1].

При действии поля  $-\Delta H$  (размагничивающее поле для рассматриваемой магнитной

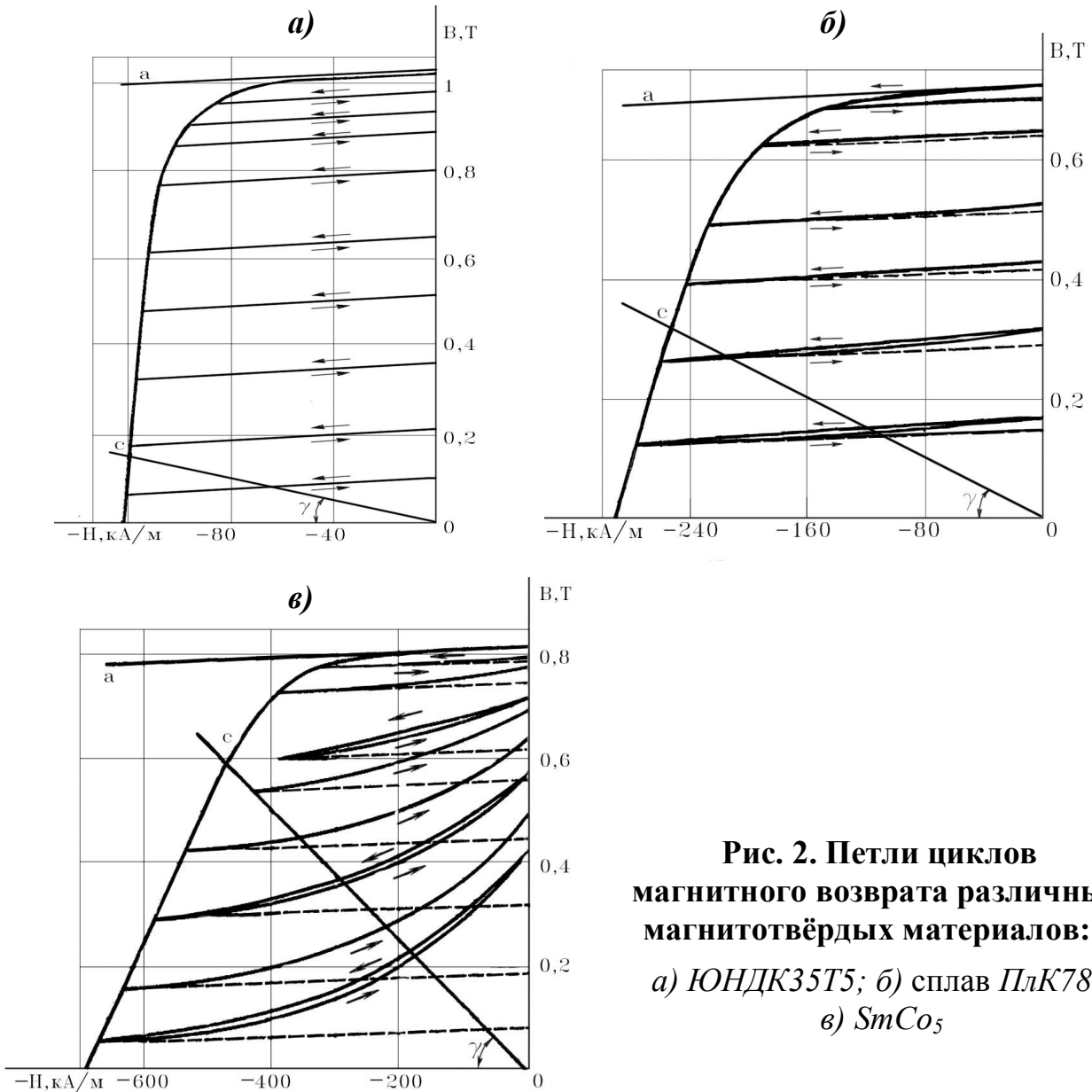


**Рис. 1. Схематическое изображение действия внешнего магнитного поля на постоянный**

системы) рабочей точкой станет точка  $E$ . После снятия поля магнитное состояние, изменяясь по прямой возврата  $EF$ , будет определяться точкой  $F$  и индукцией  $B_f$ , т.е. произойдет необратимое изменение индукции. Очевидно, что повторное действие такого же поля приведет лишь к обратному изменению индукции.

Из вышесказанного следует, что для определения изменений величины магнитного поля постоянного магнита или определения магнитного состояния магнита, прошедшего магнитную стабилизацию, т. е. находящегося на петле магнитного возврата, необходимо иметь сведения о наклоне линии магнитного возврата и её растворе.

Установлено [1, 4], что кривизна линий магнитного возврата увеличивается с возрастанием



**Рис. 2. Петли циклов магнитного возврата различных магнитотвёрдых материалов:**

- а) ЮНДК35Т5; б) сплав Плк78; в) SmCo<sub>5</sub>*

коэрцитивной силы  $H_{cm}$ , а наклон нижней ветви в точке отхода от кривой размагничивания можно считать равным наклону касательной к кривой размагничивания  $B=f(H)$  в точке с координатами  $B=B_r, H=0$ . Раствор петель у всех современных магнитотвёрдых материалов является незначительным, и при расчётах магнитных систем им можно пренебрегать, заменяя петли магнитного возврата их средними линиями.

Наименьшим раствором (практически прямая линия), параллельностью касательной к кривой размагничивания и наименьшей кривизной петель магнитного возврата обладают литые магниты (рис. 2,а).

У сплава  $PtCo$  (платина – кобальт – Плк78), обладающего вдвое большей коэрцитивной силой  $H_{cm}$  (рис. 2,б), петли магнитного возврата имеют незначительный раствор и небольшую кривизну, которые возрастают при переходе от верхних петель к нижним. Наклон касательной к любой из петель возврата равен наклону касательной  $ab$ .

У магнитов из редкоземельных элементов, например, интерметаллического соединения  $SmCo_5$  (рис. 2, в), коэрцитивная сила  $H_{cm}$  которого более чем в два раза превышает коэрцитивную силу сплава  $PtCo$ , петли магнитного возврата имеют более заметный раствор и сильно искривлены. Однако и здесь наклон касательной к нижней ветви каждой петли равен наклону касательной  $ab$ .

Обычно при расчете магнитных систем используют ту часть кривой намагничивания, которая лежит выше точки ее пересечения (точка  $c$ ) с прямой нагрузки, проведенной под углом  $\gamma$  по условию  $tg\gamma = \mu_0$ . Угол  $\gamma$  соответствует максимальному наклону линии нагрузки (размагничивающий фактор по намагничению равен единице). Из рис. 2 следует, что для всех точек отхода, лежащих выше точки  $c$ , кривизна и раствор петель магнитного возврата оказываются незначительными. Поэтому можно считать, что у всех магнитотвёрдых материалов линии магнитного возврата достаточно хорошо аппроксимируются прямыми, параллельными касательной к кривой размагничивания в точке с координатами  $B = B_r, H = 0$ .

Рассмотрим, как на стадии расчёта и конструирования магнитной системы можно обеспечить снижение изменений магнитного поля магнитной системы, неизбежного за счет воздействия внешних магнитных полей.

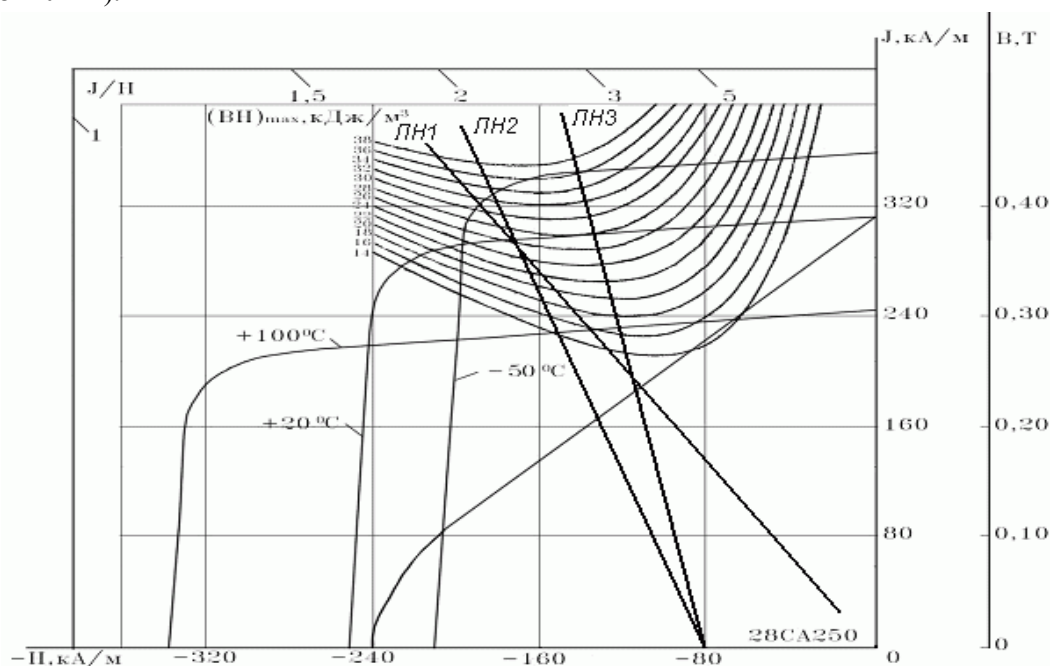
Для анализа введем понятие размагничивающего фактора  $N$ , характеризующего нагрузку на постоянный магнит:

$$N = H/J,$$

где  $H$  – напряжённость магнитного поля;  $J$  – намагничённость в рабочей точке.

Пусть требуется сконструировать магнитную систему с металлокерамическими магнитами, например, с постоянным магнитом из феррита стронция марки  $28CA250$ . Кривые размагничивания данного материала при различных температурах приведены на рис. 3 [5].

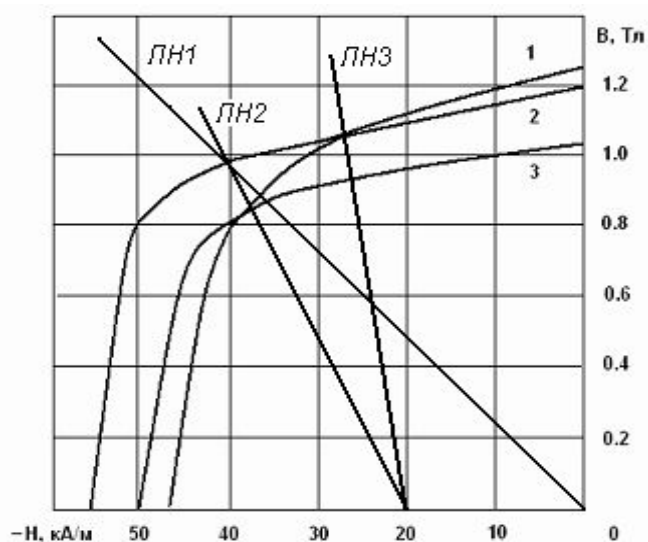
Величина плотности магнитной энергии, отдаваемой магнитом во внешнее пространство, определяется координатами рабочей точки на кривой намагничивания. Каждой точке кривой размагничивания соответствует вполне определенное значение произведения  $(B \cdot H)$ , поэтому и сама эта кривая представляет зависимость плотности магнитной энергии магнита. При проектировании магнитных систем с постоянными магнитами стремятся к тому, чтобы рабочая точка находилась в точке максимальной величины произведения  $(B \cdot H)_{max}$ , которая является теоретическим пределом магнитной энергии, отдаваемой единицей объема магнита. Следовательно, линия нагрузки должна проходить через указанную точку. Тогда допустимое предельное значение размагничивающего фактора по намагничению для магнита из феррита стронция марки  $28CA250$ , работающего при температуре  $20^\circ C$ , будет равно  $N = 0,59$  (линия нагрузки  $ЛН1$ ).



**Рис. 3. Кривые размагничивания ферритового магнитотвёрдого материала марки  $28CA250$**

снижении температуры до минус 50 °С, то допустимое предельное значение размагничивающего фактора по намагниченности для магнита в этом случае будет  $N = 0,38$  (линия нагрузки ЛН2). Если необходимо исключить необратимую потерю намагниченности при данной температуре минус 50 °С при приложении внешнего размагничивающего поля 80 кА/м, то допустимое предельное значение размагничивающего фактора по намагниченности для магнита в этом случае будет  $N = 0,16$  (линия нагрузки ЛН3). Нагревание такого магнита до температуры 250 °С к необратимой потере намагниченности не приведёт.

Пусть требуется сконструировать магнитную систему с постоянным литым магнитом марки ЮН14ДК24. Кривые размагничивания данного магнитотвёрдого материала при различных температурах приведены на рис. 4.



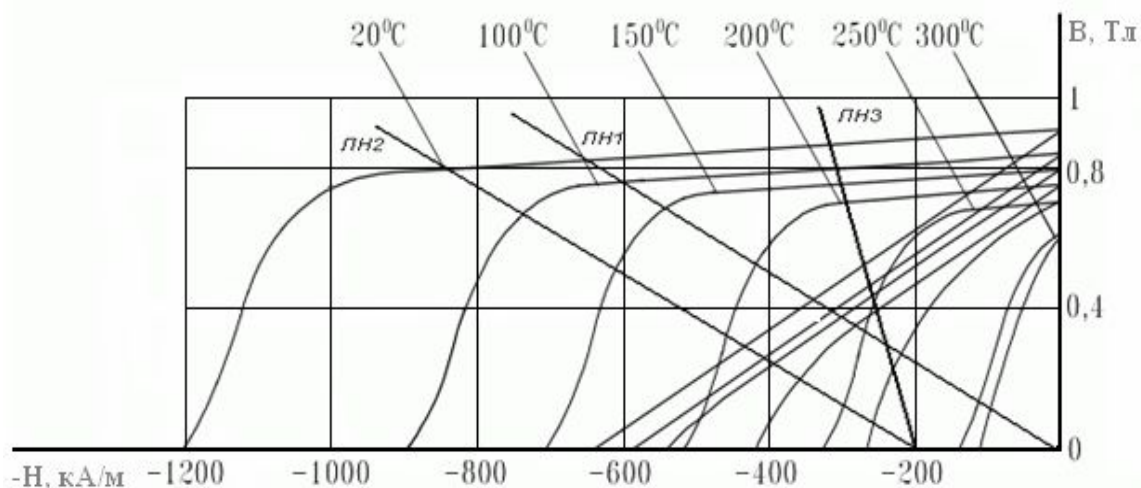
**Рис. 4. Кривые размагничивания сплава ЮН14ДК24 при различных значениях температуры:**

1 — минус 180°С; 2 — плюс 20°С; 3 — плюс 550°С

Согласно рекомендациям для конструирования магнитных систем с постоянными магнитами, линия нагрузки должна проходить через точку  $(BH)_{max}$ . В рассматриваемом случае это линия нагрузки ЛН1 (рис. 4) с проницаемостью формы  $m=B/H=21,6$ . Поскольку коэффициент  $m$  зависит только от формы магнита, то по его численному значению можно по эмпирическим формулам или графикам [5] определить оптимальную геометрию магнита.

Если требуется, чтобы магнитная система была устойчива к воздействию размагничивающих магнитных полей с величиной не более 20 кА/м, то линия нагрузки должна соответствовать ЛН2 с проницаемостью формы  $m=B/H=44$ . Для обеспечения устойчивости к воздействию размагничивающих магнитных полей с величиной не более 20 кА/м в диапазоне температур «минус 180 °С ÷ плюс 550 °С», линия нагрузки должна соответствовать ЛН3 (рис.4) с проницаемостью формы  $m=B/H=160$ .

Пусть требуется сконструировать магнитную систему с постоянным магнитом марки Sm-Co<sub>5</sub>. Кривые размагничивания рассматриваемого магнитотвёрдого материала при различных температурах приведены на рис. 5.



**Рис. 5. Кривая размагничивания Sm-Co<sub>5</sub> материала марки ВМ18**





Согласно рекомендациям для конструирования магнитных систем с редкоземельными магнитами, имеющими высокие значения коэрцитивной силы по намагниченности, линия нагрузки должна быть близка к предельно допустимой с размагничивающим фактором  $N \leq 1$ . В рассматриваемом случае это линия нагрузки *ЛН1* (рис. 5).

Если требуется, чтобы магнитная система была устойчива к воздействию размагничивающих магнитных полей с величиной не более 200 кА/м, то линия нагрузки должна соответствовать *ЛН2* (рис. 5) с тем же размагничивающим фактором  $N \leq 1$ .

Если требуется, чтобы магнитная система была устойчива к воздействию размагничивающих магнитных полей с величиной не более 200 кА/м в диапазоне температур до 200 °С, то линия нагрузки должна соответствовать *ЛН3* (рис. 5) с размагничивающим фактором  $N = 0,21$ .

**Выводы.** Таким образом, воздействие внешних магнитных полей приводит к изменениям магнитного поля магнитной системы, как обратимым, так и необратимым. Возможность таких изменений может быть учтена на стадии расчёта и конструирования магнитной системы и, если эти изменения нежелательны, то они могут быть сведены к допустимому уровню. Для этого необходимо по кривым размагничивания конкретного магнитотвёрдого материала определить оптимальные значения коэффициента проницаемости формы  $m$  и размагничивающего фактора  $N$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарев И.В., Галбаев Ж.Т. Электромагнитные механизмы с постоянными магнитами и схемы их управления для систем автоматики. – Б.: Изд-во «Илим», 2008. – 274 с.
2. Бочкарев И.В., Галбаев Ж.Т. Выбор типа постоянных магнитов для поляризованных электромагнитных механизмов и разработка устройства для их намагничивания / Известия КГТУ №11. 2007, – С.65-70.
3. Патент КР № 1057. Способ управления электроприводом, содержащего нормально замкнутую поляризованную электромагнитную муфту / И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев // Интеллектуальная собственность. 2008. Бюл. № 7.
4. Галбаев Ж.Т. Разработка схемы управления электроприводом, содержащим электромагнитную муфту с постоянными магнитами / Мат-лы Международной научно-техн. конф. «Проблемы автоматизации, управления, экономики и подготовки кадров для современных производств», Филиал БГТУ «Военмех». Санкт-Петербург. 2008. С.7-13.
5. Постоянные магниты: Справочник. Под ред. Ю.М. Пятина. М.: Энергия, 1971. – 486 с.

