

## Способ определения температурной и временной стабильности магнитных систем с постоянными магнитами.

**77-30569/256238**

# 11, ноябрь 2011

Борута В. С., Винтайкин Б. Е.

УДК 05.11.00

МГТУ им. Н.Э. Баумана

НИИ прикладной механики им. В.И. Кузнецова

[borutaV@mail.ru](mailto:borutaV@mail.ru)

[vintaikb@mail.ru](mailto:vintaikb@mail.ru)

К приборам точной механики предъявляются повышенные требования по температурной и временной стабильности электромеханических характеристик чувствительных элементов. Поэтому совершенствование известных и разработка новых методов определения и анализа температурной и временной стабильности магнитных параметров, пригодных для инженерной практики, имеют важное значение.

Вопросам исследования и расчёта температурных и временных коэффициентов магнитной индукции магнитотвёрдых сплавов посвящено значительное число работ [1- 4].

В ряде работ, например [5], [6], рассматриваются способы формирования высокой температурной и временной стабильности магнитных параметров магнитных материалов.

Однако на практике нередко встречаются случаи, когда необходимо определить эксплуатационную стабильность конкретных магнитных систем с постоянными магнитами.

В данной статье описана методика и установка для определения температурного коэффициента и коэффициента временной стабильности индукции в рабочих зазорах магнитных систем (МС), а также приведены результаты экспериментальных исследований для конкретных датчиков момента, разработанных в НИИ прикладной механики им. В.И. Кузнецова.

**Метод и устройство для определения температурного коэффициента индукции в рабочих зазорах магнитных систем.**

В основу метода для определения температурного коэффициента индукции (ТКИ) положен компенсационный индукционно-непрерывный способ измерения.

Устройство представляет собой генератор переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов (рис. 1). МС, установленная на ротор синхронного двигателя (СД), вращается с постоянной угловой скоростью. В неподвижной рамочной обмотке (статор МЭП), установленной в рабочих зазорах МС, наводится ЭДС, среднее значение которой определяется по формуле:

$$E_{\text{ср}} = 4f SW B_m, \quad (1)$$

где  $E_{\text{ср}}$  – среднее значение ЭДС;

$f$  – циклическая частота вращения МС;

$SW$  – площадь рамочной обмотки;

$B_m$  – максимальное значение индукции в рабочем зазоре МС;

Питание СД осуществляется от блока статического преобразователя, частота которого поддерживается с высокой точностью. Исследуемая ЭДС  $E_{\text{ср}}$  выпрямляется (если  $E_{\text{ср}} < 1В$ , то она предварительно усиливается). Выпрямленная ЭДС компенсируется стабилизированным напряжением. Разность измеряется вольтметром постоянного тока.

Температура МС определяется в её рабочих зазорах по изменению сопротивления одной из обмоток статора, которое регистрируется постоянно подключённым к ней измерителем сопротивления.

Измерение температуры определяется по формуле:

$$T_2 - T_1 = (RT_2 - RT_1) / (\alpha R_0) \quad (2)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – значение температуры в начале и конце эксперимента, соответственно;

$RT_1$ ,  $RT_2$ ,  $R_0$  – значение сопротивления обмотки статора в начале, в конце эксперимента и при  $T = 0^\circ\text{C}$ ,

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала провода обмотки.

ТКИ определяется в следующей последовательности.

Устройство с МС помещается в термокамеру, запускается СД и после завершения теплового переходного процесса в нормальных условиях производится измерение параметров: ЭДС переменного сигнала  $E_1$ , выпрямленного сигнала  $E_1'$ , разностного сигнала  $\Delta E_1 = E_1' - E_1''$ , где  $E_1''$  - значение напряжения компенсационного сигнала; сопротивления обмотки статора  $R_1$  при исходной температуре  $T_1$ .

Предполагается, что тепловой переходный процесс завершён, когда сопротивление обмотки становится практически неизменным. Затем включается нагрев термокамеры на заданную температуру  $T_i$ . После завершения теплового переходного процесса измеряются параметры  $E_i, E''_i, \Delta E_i = E'_i - E''_i$  и  $R_i$ .

ТКИ определяется по формуле:

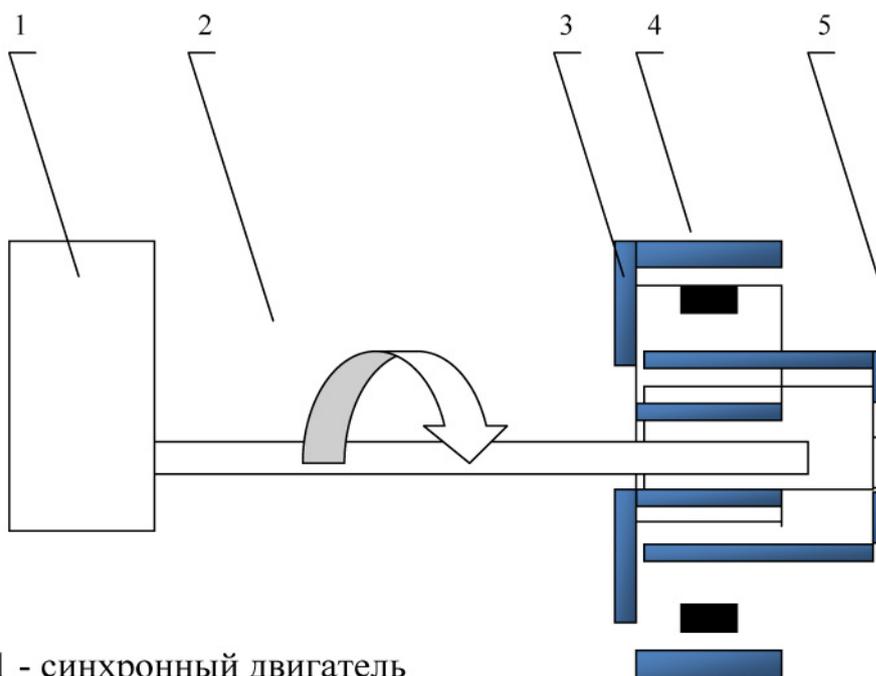
$$\delta = [\alpha R_0 (\Delta E_1 - \Delta E_i) (E_1 - E_i)] / [E_1 (R_1 - R_i) (E'_i - E''_i)] \quad (3)$$

где  $\delta$  - ТКИ МС, 1/град;

$\Delta E_1, \Delta E_i, E_1, E_i, E'_i$  и  $E''_i$  – значения ЭДС;

$R_1, R_i, R_0$  – сопротивления обмотки.

### Структурная схема устройства для определения температурного коэффициента индукции магнитных систем



- 1 - синхронный двигатель
- 2 - ось роторов синхронного двигателя
- 3 - исследуемая магнитная система
- 4 - магниты магнитных систем
- 5 - статор

Рис. 1

Если ТКИ МС более 0,01%, то можно исключить схему выпрямления и компенсации и определить ТКИ по формуле:

$$\delta = [\alpha R_0 (E_1 - E_i)] / [E_1 (R_1 - R_i)] \quad (4)$$

В тех случаях, когда вращение МС невозможно, целесообразно использовать вибрационный принцип преобразования сигнала.

Погрешность определения ТКИ магнитных систем находится в пределах 3-20%.

### ***Методы и устройство для определения временной стабильности индукции в рабочих зазорах магнитных систем.***

После намагничивания или частичного размагничивания МС из-за магнитной вязкости наблюдаются эффекты последействия, которые можно рассматривать как процесс установления термодинамического равновесия.

На основании исследований стабильности магнитов и МС, считается установленным, что зависимость магнитной индукции во времени подчиняется логарифмическому закону [1] и выражается формулой:

$$\Delta B / B_1 = \eta \lg t_i / t_1 \quad (5)$$

где  $t_1$  – базисное время, определяемое с момента последнего магнитного воздействия до момента измерения индукции;

$\Delta B = B_i - B_1$  – приращение магнитной индукции за промежуток времени  $t_i - t_1$ ;

$B_i$  – значение индукции в момент времени  $t_i$

$\eta$  – коэффициент временной нестабильности.

Таким образом, коэффициент  $\eta$  характеризует приращение магнитной индукции за промежуток времени от  $t_1$  до  $10t_1$ , и является критерием оценки временной нестабильности МС.

По коэффициенту  $\eta$ , полученному для сравнительно небольших промежутков времени, порядка секунд или минут, рассчитываются зависимости, характеризующие нестабильность для значительно больших промежутков времени – часов, суток, месяцев, лет. В этом случае следует принимать для базисного времени  $t_1$  другое значение, которое может быть в десятки, сотни и даже тысячи раз больше первоначального значения  $t_1$ , для которого определяется коэффициент  $\eta$ .

В основу метода для определения коэффициента  $\eta$  положен компенсационный индукционно-непрерывный способ измерения, в котором сигнал исследуемой МС компенсируется сигналом компенсационной МС.

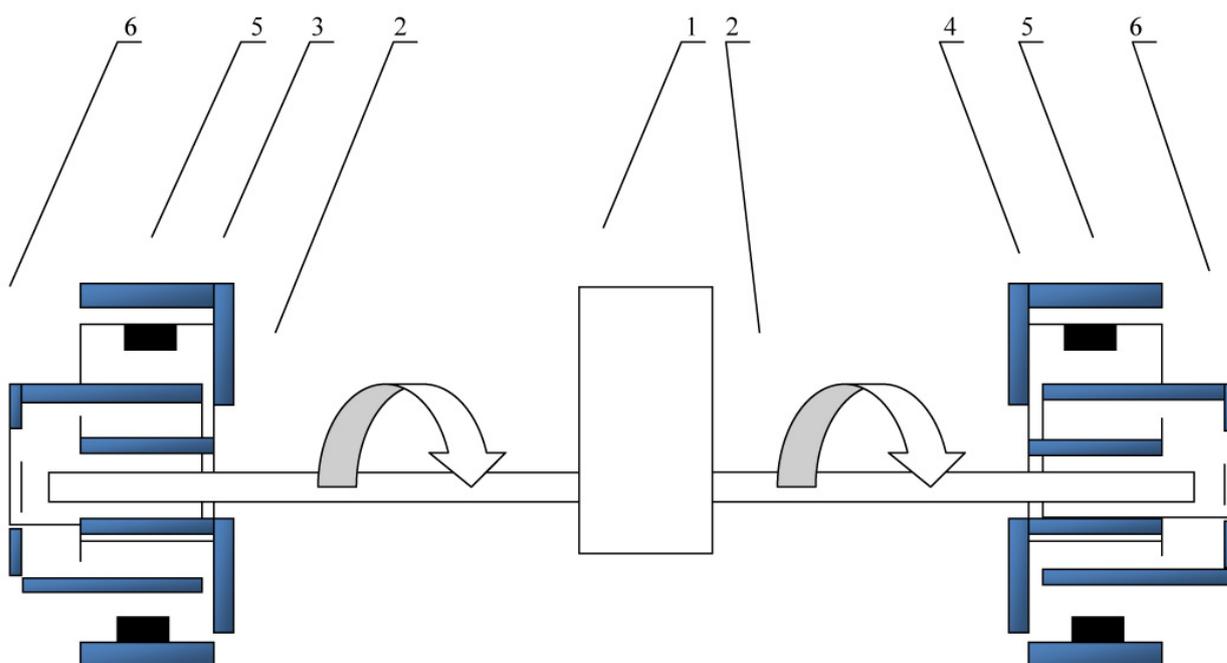
Измеряется ЭДС рамочной обмотки статора, помещённой в рабочий зазор исследуемой МС, где индукция изменяется после магнитных воздействий (немагничивание или размагничивание) с течением времени.

Устройство представляет собой 2 автономных генератора переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов.

Исследуемая и компенсационная МС устанавливаются на одном валу ротора СД. В статорах, установленных в рабочих зазорах МС, наводятся ЭДС при вращении МС. Обмотки соединены последовательно встречно. Структурная схема измерения коэффициента  $\eta$  приведена на рис. 2.

Исследуемая МС подвергается воздействию через специальный индуктор намагничивающего или размагничивающего (стабилизирующего) импульса магнитного поля. Сразу после магнитного воздействия подаётся питание на СД, который через 15-20 с входит в синхронизм.

#### **Структурная схема устройства для измерения коэффициента временной неустойчивости**



- 1 – синхронный двигатель
- 2 - ось роторов синхронного двигателя
- 3 - исследуемая магнитная система
- 4 – компенсационная магнитная система
- 5 - магниты магнитных систем
- 6 - статора

Рис. 2

Амплитуда сигнала исследуемой МС компенсируется амплитудой компенсационной (при использовании потенциометра), фаза компенсируется изменением угла расположения статора компенсационной МС. Усиленный разностный сигнал измеряется вольтметром переменного тока.

Источником значительной погрешности измерения коэффициента является изменение температуры при измерениях за счёт: окружающей среды, выделения тепла в индукторе после воздействия импульсного поля и изменения токов в обмотках СД.

Влияние температуры окружающей среды и тепла, выделяемого индуктором, снижается тем, что устройство помещается в термостат, а на индукторе устанавливается теплоотвод. Изменение температуры МС за счёт нестабильности тока в обмотках СД практически устранить трудно. Поэтому необходимо учитывать изменения температуры внутри МС и вводить поправку с учётом ранее определённого ТКИ. ТКИ обеих МС усредняются по формуле:

$$\delta = 0,5(\delta_{и} + \delta_{к}) \quad (6)$$

где  $\delta_{и}$  – ТКИ исследуемой МС;  $\delta_{к}$  – ТКИ компенсационной МС.

В качестве термодатчика в устройстве используется одна из обмоток статора, к которой постоянно подключён мост постоянного тока. Температура в рабочем зазоре МС определяется по формуле (3).

Экспериментальными исследованиями подтверждено, что установившаяся через ~ 1 мин температура в исследуемой и компенсационной МС практически одинакова, т. е.  $\Delta T_{и} = \Delta T_{к} = \Delta T$ ; где  $\Delta T_{и}$  и  $\Delta T_{к}$  – изменение температуры исследуемой и компенсационной МС, соответственно.

Изменение индукции в рабочем зазоре исследуемой МС после магнитного воздействия с течением времени, пропорциональное изменению ЭДС, в описываемой компенсационной схеме определяется формулой:

$$\Delta E = E_{и} - E_{к}, \quad (7)$$

где  $E_{и}$  и  $E_{к}$  – ЭДС в обмотках статоров исследуемой и компенсационной МС, соответственно.

В рассматриваемой методике измеряется разность двух компенсированных сигналов, т.е.  $\Delta E_1 - \Delta E_i$ ; где  $\Delta E_1$  и  $\Delta E_i$  – сигналы до магнитного возмущения и после.

По измеренной разности сигналов судят об относительном изменении индукции в зазоре исследуемой МС:

$$\Delta B / B_{и} = (\Delta E_1 - \Delta E_i) / E_{и} \quad (8)$$

Формулу (5) для коэффициента  $\eta$  можно представить в виде:

$$\eta = (\Delta E_1 - \Delta E_i) / (E_{и} \lg t_i / t_1) \quad (9)$$

С учётом изменения температуры исследуемой и компенсационной МС формулы (3) или (4) ТКИ обеих МС, коэффициента усиления  $K_{ус}$  сигналов  $\Delta E_1$  и  $\Delta E_i$  формула (9) примет вид:

$$\eta = \{ \alpha R_0 (\Delta E_1 - \Delta E_i) \} / \{ K_{ус} [ \alpha R_0 - \delta (R_1 - R_i) ] E_{и} \lg t_i / t_1 \} \quad (10)$$

По формуле (10) определяется коэффициент временной нестабильности МС после их намагничивания или стабилизации методом частичного размагничивания.

В тех случаях, когда вращение МС невозможно, целесообразно использовать вибрационный принцип преобразования сигнала.

Погрешность определения коэффициента  $\eta$  МС находится в пределах 10-50%.

**Результаты исследования коэффициентов температурного и временной неустойчивости индукции магнитных систем.**

В таблице (1) представлены результаты определения коэффициентов и магнитных систем с постоянными магнитами из сплавов ЮН 4ДК24, ПлК – 78 и на основе Sm Co5 при намагничивании магнитов до насыщения и частичного размагничивания на 10% с целью стабилизации.

Т а б л и ц а 1.

Вид магнитного воздействия	Определённый параметр	Тип датчика момента и материал его постоянных магнитов		
		ДМП– 19 ЮН 142К24	ДМП– 13 ПлК - 78	ДМП– 49 Sm Co5
Намагничивание магнитов до насыщения	$\delta \cdot 0,01\%/^{\circ}\text{C}$	0,9 - 1,2	1,5 – 1,8	2,5 – 3,5
	$\eta \cdot 0,01\%$	3 - 4	1,5 – 1,7	0,4 – 1,5
Частичное размагничивание (стабилизация) на 10%	$\delta \cdot 0,01\%/^{\circ}\text{C}$	0,9 – 1,0	1,2 – 1,6	2 – 3
	$\eta \cdot 0,01\%$	2,3 – 2,5	0,9 – 1,2	0,35 – 1,0

Из данных, приведённых в таблице 1 следует:

1. Коэффициент  $\delta$  практически не меняется (или незначительно уменьшается) после стабилизации методом частичного размагничивания на 10%;
2. Коэффициент  $\eta$  уменьшается после стабилизации;
3. Значение коэффициента  $\eta$  тем меньше, чем больше коэрцитивная сила по намагниченности материала магнита (сплав ЮН 142К24 –  $jH_c = 48 \text{ кА/м}$ , ПлК – 78 –  $jH_c = 300 \text{ кА/м}$ , Sm Co5 –  $jH_c = 1200 \text{ кА/м}$ ).

Измерения температурной неустойчивости проводились при температурах от 20 до 250°C. При повышенных температурах ТКИ возрастает, причём для каждой МС это возрастание, как и следовало ожидать, существенно зависит от температуры Кюри постоянных магнитов, входящих в состав МС.

Следует отметить, что для каждой конкретной МС можно выделить обратимые и необратимые изменения магнитной индукции в рабочем зазоре. После необратимых изменений исходные значения индукции не восстанавливаются при повторном намагничивании. Предложенная методика позволяет очень быстро и надёжно обнаружить необратимые изменения магнитных параметров и установить температуру при которой эти необратимые изменения проявляются.

Кроме того, существенное влияние как на температурную, так и на временную стабильность оказывает размагничивающий фактор МС. Причём, как было замечено, увеличение размагничивающего фактора и глубина размагничивания при стабилизации приводит к снижению температуры, при которой проявляются необратимые изменения магнитной индукции в рабочих зазорах МС.

### Список литературы

1. **Миткевич А.В.** Стабильность постоянных магнитов. Л.: Энергия, 1971.
2. Изучение временной и температурной стабильности постоянных магнитов из сплавов Sm Co<sub>5</sub> и (Sm, Gd, Er) Co<sub>5</sub>: Отчёт ИФМ УНЦ АН СССР. Руководитель работы Я.С. Шур. ГР = 81.024.472. Свердловск, 1982. 47 с.
3. Магнитные свойства и температурный коэффициент индукции сплавов Sm<sub>x</sub>(Er Gd)<sub>1-x</sub>Co<sub>5</sub>/Шур Я.С. [и др.]//ФММ. 1982. вып.4 = 54. С. 727 – 731.
4. Температурные коэффициенты индукции и магнитные свойства сплавов/Пономарёва О.И. [и др.]//ФММ. 1983. вып.6 = 55. С. 1101 – 1106
5. Об особенностях структуры монокристаллов сплавов Fe-Cr-Co-Mo с ОЦК решёткой / Винтайкин Б.Е. [и др.] //Физика металлов и металловедение. 1990. № 6. С. 137 – 144.
6. **Винтайкин Б.Е., Голиков В.А., Дударев В.В.** Особенности структуры и магнитных свойств систем взаимопроникающих областей фаз в ОЦК сплавах Fe-Cr-Co: Металлы, 2000. № 2 С. 115 – 119.

## Method for determination of the temperature and time stability of magnetic systems with permanent magnets

**77-30569/256238**

**# 11, November 2011**

**Boruta V.S., Vintaikin B.E.**

Bauman Moscow State Technical University  
The Kuznetsov Research Institute of Applied Mechanics

[borutaV@mail.ru](mailto:borutaV@mail.ru)

[vintaikb@mail.ru](mailto:vintaikb@mail.ru)

This article is devoted to the method for determination of the temperature and time stability of magnetic parameters in systems with permanent magnets. The method for determination of the temperature coefficient of induction (TCI) and the coefficient of time instability (CTI) was based on compensation induction-continuous measurement method. Device for TCI measurement is an AC voltage generator with permanent magnetic field. Stator is a fixed frame winding, placed in the working gap of magnetic system. Induced in the stator EMF was rectified and compensated by stabilizing voltage. Considered magnetic system (MS) was placed into thermostat. Temperature of one of the stator's windings was measured. Temperature stability of MS could be inferred by compensated signal. Device for CTI measurement consists of two autonomous AC voltage generators with permanent magnetic field. One of them is a researched MS; the other one is a stabilized MS. Windings of two stators were opposite. Time stability of MS could be inferred by the dependence of compensated signal on time. The developed method allows to determine temperature and time stability of MSs used in fine mechanics devices, with high accuracy.

---

**Publications with keywords:** [temperature factor of the induction](#), [factor of temporal instability](#), [hard magnetic materials](#), [magnetic systems with permanent magnets](#), [the degaussing factor](#), [magnetic stabilization](#)

**Publications with words:** [temperature factor of the induction](#), [factor of temporal instability](#), [hard magnetic materials](#), [magnetic systems with permanent magnets](#), [the degaussing factor](#), [magnetic stabilization](#)

---

## Reference

1. Mitkevich A.V., The stability of permanent magnets, Leningrad, Energiia, 1971.
2. Izuchenie vremennoi i temperaturnoi stabil'nosti postoiannykh magnitov iz splavov SmCo<sub>5</sub> i (Sm, Gd, Er) Co<sub>5</sub>: Otchet IFM UNTs AN SSSR. Rukovoditel' raboty Ia. S. Shur. GR = 81.024.472. Sverdlovsk, 1982. 47s.
3. Shur Ia. S., et al., FMM 54 (4) (1982) 727 – 731.
4. Ponomareva O. I., et al., FMM 55 (6) (1983) 1101 – 1106.
5. Vintaikin B. E., et al., Fizika metallov i metallovedenie 6 (1990) 137 – 144.
6. Vintaikin B.E., Golikov V.A., Dudarev V.V., Metally 2 (2000) 115 – 119.