

Тахогенератор-акселерометр с улучшенными метрологическими характеристиками

ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ЯНГИРОВ И.Ф.

Приведены результаты исследования акселерометра, способного также работать и в режиме тахогенератора. Благодаря многофункциональности и улучшенным метрологическим характеристикам такой акселерометр может найти применение в прибор- и машиностроении.

Ключевые слова: тахогенератор, акселерометр, расчетная схема, магнитное поле, магнитное число Рейнольдса, выходная характеристика

Исследуемая конструкция акселерометра (рис. 1) содержит статор 1 с полюсами возбуждения из постоянных магнитов 2 и полюсами 3 с измерительной обмоткой 4 и компенсационной обмоткой 5, полый электропроводящий ротор 6 и усилитель 7. Компенсационная обмотка 5 расположена соосно и также подключена встречно с измерительной обмоткой 4, которая подсоединена к входу усилителя 7. Выход усилителя, в свою очередь, подключен к компенсационной обмотке 5. Ротор 6 выполнен с продольными прорезями 8 вдоль него, шаг которых равен полюсному делению, причем ротор на участках между продольными прорезями выпол-

Results from a study of an accelerometer able to operate also as a tachogenerator are presented. Owing to its multifunctional nature and improved metrological characteristics, such accelerometer can find use in the instrument and machinery construction industries.

Key words: tachogenerator, accelerometer, analysis circuit, magnetic field, magnetic Reynolds number, output characteristic

нен из изолированных друг от друга аксиальных пластин 9, замкнутых на торцах ротора.

Особенностью функционирования акселерометра является то, что при вращении ротора с некоторой постоянной скоростью ω возникающий переменный магнитный поток Φ_q (обусловлен поперечной реакцией ротора), сцепляясь с измерительной обмоткой 4, индуцирует ЭДС, пропорциональную угловой скорости вращения ротора. Таким образом, акселерометр работает как тахогенератор — в отличие от акселерометра с гладким полым ротором [2], который измеряет только угловое ускорение.

на ПЛК Twido процессорной мощности достаточно, но определяющим фактором будет суммарная задержка, состоящая из времени цикла сканирования программы и времени собственно передачи пакетов данных по сети. При практической реализации многокоординатной системы управления потребуются дополнительные исследования и учёт особенностей организации функционирования программного обеспечения и обмена информацией в контроллерах преобразователей частоты, не указанных в технических данных этих устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бычков В.П.** Электропривод и автоматизация металлургического производства. — М.: Высшая школа, 1977.
2. **Ключев В.И.** Теория электропривода: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1998.
3. **Терехов В.М., Осипов О.И.** Системы управления электроприводов: Учебник для студентов высш. учеб. заведений. — М.: Изд. центр «Академия», 2005.

4. **Чаки Ф.** Современная теория управления. Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. — М.: Мир, 1975.

5. **Бычков М.Г., Кукушкин М.С.** Исследование на компьютерной модели влияния квантования по времени в контуре регулирования положения. — Труды МЭИ. Электропривод и системы управления. — М.: Издат. дом МЭИ, 2010, вып. 686.

[30.06.11]

Авторы: Бычков Михаил Григорьевич окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности и транспорта Московского энергетического института (МЭИ) в 1973 г. В 1999 г. защитил в МЭИ докторскую диссертацию «Основы теории, управление и проектирование вентильно-индукторного электропривода». Профессор кафедры автоматизированного электропривода МЭИ.

Кукушкин Михаил Сергеевич окончил МЭИ в 2008 г. Аспирант кафедры автоматизированного электропривода МЭИ.

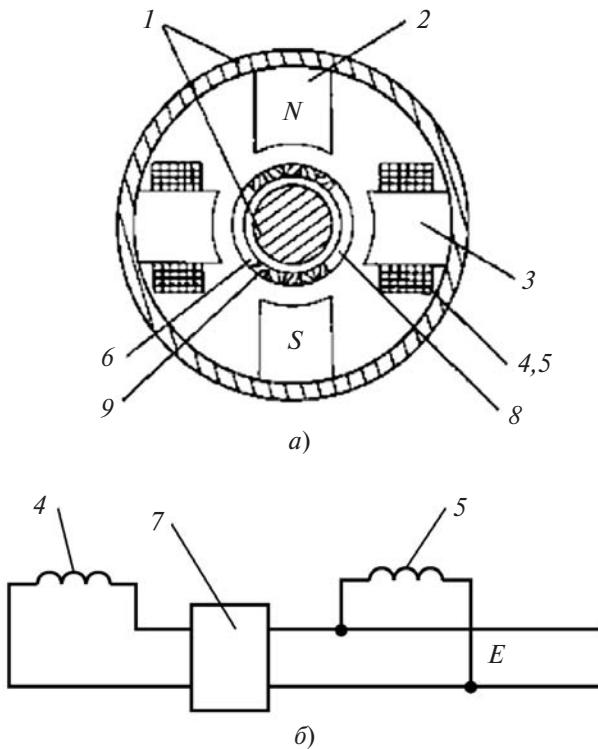


Рис. 1. Конструкция универсального акселерометра (а) и схема подключения его обмоток (б)

На рис. 2 представлена расчетная схема ротора акселерометра в виде плоскопараллельной пластины с прорезями [3], которая использовалась многими авторами при исследовании цилиндрических преобразователей с последующим введением поправочного коэффициента.

В системе координат, жестко связанной с ротором, электромагнитные процессы описываются уравнениями для комплексных амплитуд [2]:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{\delta} + \vec{\delta}_{\text{ст}}; \text{rot} \vec{E} = -j\omega \vec{B}; \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}; \vec{\delta} = \sigma \vec{E},$$

где $\vec{\delta}_{\text{ст}}$ – плотность стороннего тока; \vec{H} – напряженность магнитного поля; μ – магнитная проницаемость; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $\vec{\delta}$ – плотность первичного и вторичного токов; \vec{E} – напряженность электрического поля ротора.

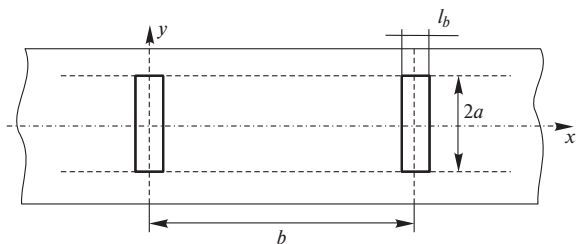


Рис. 2. Расчетная схема ротора в виде плоскопараллельной пластины с прорезями: l_b – ширина прорези; b – расстояние между прорезями

При решении принимаются допущения, мало искажающие реальную картину электромагнитных процессов: толщина рабочего зазора значительно меньше среднего радиуса и магнитное поле плоскопараллельно, что позволяет представить расчетную схему ротора в виде плоскопараллельной пластины с продольной прорезью; индукция первичного магнитного поля в воздушном зазоре задана основной пространственной гармоникой индуктора; вне индуктора поле равно нулю; плотность вихревых токов по толщине ротора постоянна; магнитная проницаемость материала ротора равна μ_0 , а магнитная проницаемость стали магнитопровода большая; ширина прорези мала по сравнению с расстоянием между прорезями ($l_b < b$).

Напряженность магнитного поля определяется в виде суммы напряженностей поля индуктора (известное поле) H_1 и поля индуцированных вихревых токов H_2 .

В [3] при принятых допущениях получено выражение для момента, действующего на активную зону ротора:

$$M_z = \frac{\pi B_{1m}^2}{2 \mu_0 k_d} \Delta l_{\text{ср}} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} R, \tag{1}$$

где Δ – толщина ротора; $l_{\text{ср}}$ – средний периметр «выпрямленного ротора»; $\varepsilon_f = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{\alpha^2} k_d$ – магнитное число Рейнольдса (МЧР); $\omega = p\Omega$; Ω – угловая частота вращения; k_d – коэффициент приведения, учитывающий влияние пазов и насыщения; R – радиус ротора; p – число пар полюсов [5]; σ – удельная активная проводимость ротора; $\alpha = \pi/2b$;

Из основного уравнения динамики [2, 4] следует, что угловое ускорение акселерометра в установившемся режиме

$$\varepsilon = \frac{\pi \mu_0 H_{1m}^2}{2 k_d} \frac{\Delta l_{\text{ср}} \varepsilon_f}{m R} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} = \varepsilon_{\text{баз}} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}, \tag{2}$$

где m – масса полого ротора; $\varepsilon_{\text{баз}}$ – базовое контролируемое ускорение [6] (постоянная геометрических параметров акселерометра), т.е. угловое ускорение вращающихся частей механического привода;

Уравнение движения плоской пластины

$$x'' + 2\pi \xi x' + \omega_0^2 x = \frac{F_z}{m} \sin \omega t. \tag{3}$$

Из решения уравнения (3) определяется контролируемое тангенциальное ускорение объекта:

$$a_\tau = \frac{F_z}{m} \frac{q^2}{\sqrt{(1 - q^2)^2 + 4Dq^2}} \sin(\omega t - \alpha) = \frac{d^2 x}{dt^2}, \tag{4}$$

где $D = n\xi / \omega_0$ – степень демпфирования акселератора; q – относительная частота вращения ($q = \omega / \omega_0$).

Действующее значение магнитного потока поля индуцированных токов в теле ротора с учетом результатов [6]:

$$\Phi_{2m} = \mu_0 \frac{\varepsilon_f}{\sqrt{1 + \varepsilon_f^2}} s H_{1m}, \quad (5)$$

где s – активное полюсное сечение сигнальной обмотки.

Наводимая в сигнальной обмотке акселерометра ЭДС

$$E = 4,44 f_2 k_{об} w_2 \mu_0 \frac{\varepsilon_f}{\sqrt{1 + \varepsilon_f^2}} s H_{1m}, \quad (6)$$

где $k_{об}$ – обмоточный коэффициент; w_2 – число витков сигнальной обмотки; f_2 – частота возмущающего воздействия.

Индуктивность обмотки акселерометра в установившемся режиме [6]:

$$L_r = \frac{4\mu_0 l w_2^2 k_{об}^2}{p \tau \delta \Delta^2}; \quad (7)$$

$$M_z = L_r I^2 p \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} = \frac{4\mu_0 \tau l w_2^2 I^2}{\delta} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} = W \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}, \quad (8)$$

где I – ток возбуждения; $W = B^2 \pi R l \delta / \mu_0$ – энергия магнитного поля в воздушном зазоре; M_z – момент на валу ротора.

В этом случае угловое ускорение контролируемого объекта с вращающимся рабочим валом

$$\varepsilon = \frac{L_r I^2 p}{m R^2} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} = \varepsilon_{баз} \frac{\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2}. \quad (9)$$

Зная значения МЧР или критической скорости, можно найти необходимые параметры, варьируя которые, можно определить требуемую выходную характеристику акселерометра-тахогенератора. Например, для того чтобы сместить максимум сигнала в область более высоких скоростей, следует увеличить число пар полюсов или зазор обмотки возбуждения или уменьшить радиус, толщину или электропроводность материала ротора.

Исследуя уравнения (9) на максимум, определяем критическое значение МЧР при [6] (определяющее линейную часть характеристики акселерометра):

$$\varepsilon_{f_{баз}} = 1; \quad \varepsilon_{кр} = \frac{L_r I^2 p}{2 m R^2},$$

тогда относительная выходная характеристика определяется как

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{max}} = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{баз}} = \frac{2\varepsilon_f}{1 + \varepsilon_f^2} = \frac{2}{\varepsilon_f + 1/\varepsilon_f}. \quad (10)$$

Требования к выходным характеристикам проектируемых электромеханических устройств различны: для одних необходима линейная зависимость выходной характеристики и чувствительности от скорости, для других желательно иметь максимальную чувствительность, для третьих важно малое изменение характеристик в определенном диапазоне скоростей. Эти цели могут быть найдены путем анализа значения МЧР: если $\varepsilon \ll 0$, то зависимость выходной характеристики от частоты вращения практически линейна; если $\varepsilon_f = 1$, то выходные характеристики близки к максимальным и т.д.

В случае выполнения полого ротора акселерометра с продольными прорезями контролируемое ускорение с учетом дополнительной суммирующей составляющей (практический информационный сигнал акселерометра [3]) формулу (10) окончательно можно представить как

$$\varepsilon = \varepsilon_{баз} (\varepsilon_i^* + \Delta\varepsilon_i^*). \quad (11)$$

На рис. 3 представлена выходная характеристика акселерометра с продольными прорезями на роторе (теоретические кривые, полученные с учетом $\Delta\varepsilon_i$ [3]).

Из рис. 3 видно, что выполнение прорезей на роторе приводит к повышению крутизны преобразовательной характеристики и чувствительности, причем с увеличением числа прорезей эти характеристики возрастают при смещении их в сторону малых частот. Особенно эффективно применение прорезей в маломощных и малогабаритных акселерометрах.

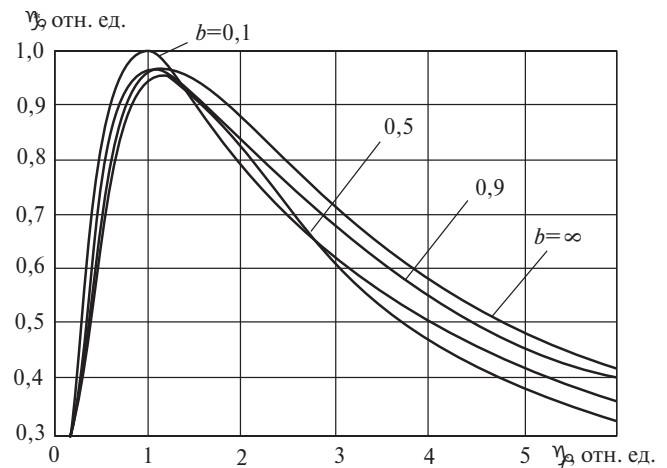


Рис. 3. Выходные характеристики акселерометра с продольными прорезями на роторе; $a = 1$, $b_f = 0,2$

Уравнение выходной характеристики тахогенератора [7]:

$$E = \frac{2,22\omega}{\pi} k_{об} w_2 \mu_0 \frac{\varepsilon_f}{\sqrt{1+\varepsilon_f^2}} sH_{1m}, \quad (12)$$

где ω — измеряемая угловая частота вращения.

Чувствительность тахогенератора определяется как [4]:

$$\beta = \frac{dE}{d\omega} = \frac{2,22}{\pi} k_{об} w_2 \mu_0 \frac{\varepsilon_f}{\sqrt{1+\varepsilon_f^2}} sH_{1m} = \beta_{баз} \frac{\varepsilon_f}{\sqrt{1+\varepsilon_f^2}}, \quad (13)$$

где $\beta_{баз}$ — базовая чувствительность (геометрическая постоянная).

График этой зависимости представлен на рис. 4.

отн. ед.

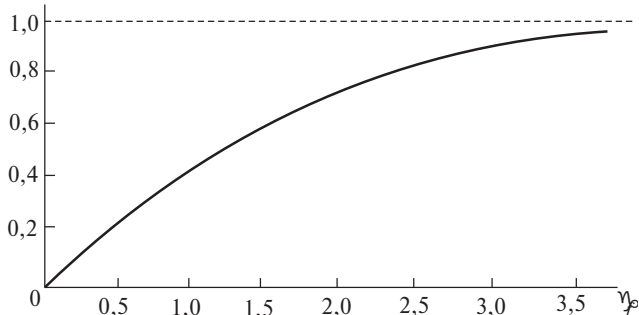


Рис. 4. Зависимость чувствительности тахогенератора от МЧР

Вывод. Полученные соотношения применимы для анализа и проектирования тахогенератора-акселерометра с учетом и без учета краевых эффектов при наличии продольных прорезей в полом роторе и могут быть полезны при исследовании и проектировании различных электромеханических систем.

тировании различных электромеханических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ №2502110. Акселерометр/И.Х. Хайруллин, Ф.Р. Исмагилов, И.Ф. Янгиров.— БИ, 1993, №15.
2. Проектирование датчиков для измерения механических величин/Под ред. Е.П. Осадчего. — М.: Машиностроение, 1979.
3. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Саттаров Р.Р. Электромагнитные демпферы с продольными прорезями полого ротора. — Электротехника, 2000, №8.
4. Гусев В. Г., Андриянова Л.П. Индуктивные и магнитомодуляционные преобразователи для передачи информации с вращающихся объектов. — М.: Энергия, 1979.
5. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим телом. — Л.: Энергия, 1970.
6. Потапов Л.А., Максимцев Е.И. Полевой подход к расчету электромеханических устройств с немагнитными роторами. — Электротехника, 2000, №8.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высшая школа, 1978.

[26.11.09]

Авторы: Исмагилов Флюр Рашитович окончил в 1973 г. факультет авиационного приборостроения Уфимского авиационного института (УАИ). В 1998 г. защитил докторскую диссертацию «Электромагнитные элементы систем управления со сложной геометрией ротора». Проректор Уфимского государственного авиационного университета.

Янгиров Ильгиз Флюсович окончил в 1988 г. факультет авиационного приборостроения УАИ, где в 1993 г. защитил кандидатскую диссертацию «Электромеханический вибрационный преобразователь со спиральным вторичным элементом для систем управления». Доцент Нефтекамского нефтяного колледжа.

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;

место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4—5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.