

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

УДК 536.53

В. Я. РАТНОВСКИЙ
 (Куйбышев)

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ С ТЕРМИСТОРОМ И ЕМКОСТНЫМ ТОКОСЪЕМНИКОМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВРАЩАЮЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ

Рассматривается измерительная цепь для бесконтактного определения температуры вращающихся деталей, образованная путем последовательного соединения термистора и двух емкостных токосъемников; выводятся соотношения для расчета чувствительности и погрешностей измерительной цепи с учетом емкостей соединительных кабелей на землю.

Основной тенденцией развития современного машиностроения является повышение рабочих скоростей машин. С увеличением скоростей происходит более интенсивный износ рабочих органов и становится все более важным и актуальным измерение параметров вращающихся деталей. Эти измерения позволяют исследовать и находить наиболее оптимальные условия работы машин и предупреждать аварийные режимы при эксплуатации механизмов и т. д. Одной из основных характеристик различных машин является температура вращающихся деталей. При измерении температуры вращающихся деталей электрическими датчиками (термопарами и термосопротивлениями) наиболее сложной проблемой, особенно при больших скоростях вращения, является передача показаний (токосъем).

Ввиду большого разнообразия машин и механизмов, требующих измерения температуры вращающихся деталей, невозможно сформулировать общие требования к диапазону измеряемых температур и точности измерений. Поэтому вопрос о точности и диапазоне измеряемых температур вращающихся деталей решается при разработке измерительных устройств для конкретных машин.

Бесконтактные методы токосъема являются наиболее перспективными и обеспечивают возможность длительных измерений вплоть до верхней границы рабочих скоростей (100—200 тыс. об/мин).

Среди устройств, предназначенных для бесконтактной передачи, емкостный токосъемник (рис. 1) конст-

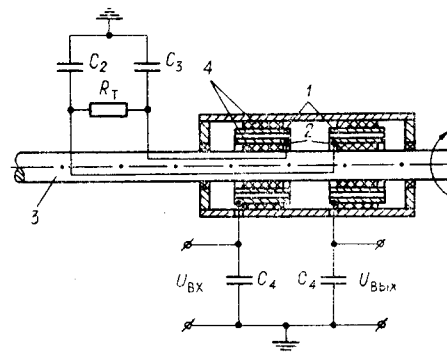


Рис. 1.

руктивно наиболее прост и, кроме того, дает возможность проводить статическую градуировку устройства (на неподвижной детали).

На рис. 1 1 — неподвижные кольца; 2 — вращающиеся кольца; 3 — вращающаяся деталь; 4 — изолирующие втулки; R_T — термистор; C_4 — емкость кабеля, проложенного стационарно; C_2, C_3 — емкости кабелей, проложенных на вращающейся детали.

Для уменьшения габаритов токосъемника целесообразно применять высокоомные полупроводниковые термосопротивления, а питание измерительной цепи производить напряжением высокой частоты.

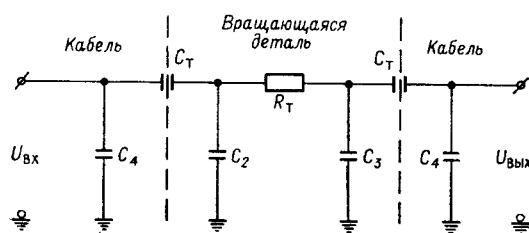


Рис. 2.

измерительная цепь будет иметь вид, представленный на рис. 2. Напряжение на емкости C_4 при изменении сопротивления термистора R_T является функцией температуры и измеряется вольтметром с большим входным сопротивлением.

Емкости соединительных кабелей определяются размерами машины и маркой выбранного кабеля, а емкость токосъемника — его габаритами. Следовательно, величины емкостей C_4, C_2 и C_T обычно известны и постоянны. Кроме того, емкости соединительных кабелей на землю часто соизмеримы с емкостью токосъемников и влияют на чувствительность измерительной цепи и погрешность измерений. Поэтому наиболее интересен вопрос о выборе параметров цепи, обеспечивающих получение максимальной чувствительности, расчет ее величины, а также определение погрешностей измерительной цепи.

Методом контурных токов определим коэффициент передачи измерительной цепи (см. рис. 2)

$$\psi = \frac{U_2}{U_1} = \frac{-j a_0}{R_T - j R_0}, \quad (1)$$

где

$$-j a_0 = \frac{x_2^2 x_4}{(x_T + x_2)(x_T + x_2 + x_4)}; \quad (1a)$$

$$-j R_0 = \frac{x_T x_2}{x_T + x_2} + \frac{x_T + x_4}{x_T + x_4 + x_2} x_2. \quad (16)$$

Так как длины прямого и обратного кабелей равны, то $x_2 = x_3$.

Обычно вольтметр, измеряющий выходное напряжение цепи, не является фазочувствительным, и поэтому нас будет интересовать абсолютная величина коэффициента передачи

$$|\psi| = \frac{a_0}{\sqrt{R_T^2 + R_0^2}}. \quad (2)$$

Необходимо определить условия максимума чувствительности по температуре, т. е. максимум $\frac{d|\psi|}{dT}$, условием которого будет равенство нулю второй производной, а именно:

$$\frac{d^2|\psi|}{dT^2} = 0. \quad (3)$$

Учитывая, что для термисторов $R_T = A e^{B/T}$, из (3) найдем

$$R_T = R_0 \varepsilon, \quad (4)$$

где

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2B/T + 2}{B/T - 2}}.$$

Наличие максимума определяется сменой знака второй производной при переходе через нуль с плюса на минус.

Подставляя в (1 б) значения реактивных сопротивлений, выраженных через емкость и частоту, и вводя обозначение

$$k = \frac{\frac{1}{C_T} + \frac{1}{C_4}}{\frac{1}{C_T} + \frac{1}{C_4} + \frac{1}{C_2}},$$

получим

$$R_0 = \frac{1}{\omega} \left(\frac{1}{C_T + C_2} + \frac{k}{C_2} \right) = \frac{1}{\omega C_k}. \quad (5)$$

Из условий (4) и (5) при выбранном термисторе и температуре, при которой чувствительность максимальна (T_m), определим частоту питания измерительной цепи

$$\omega_0 = \frac{\varepsilon}{R_T} \left(\frac{1}{C_T + C_2} + \frac{k}{C_2} \right). \quad (6)$$

Если в выражение (3) подставить значение R_0 из (5), то с учетом (4) получим величину максимальной чувствительности

$$\left(\frac{d|\psi|}{dT} \right)_{\max} = \psi_{\max} \frac{B}{T_m^2} \frac{\sigma^2 \varepsilon^2}{(\sigma^2 \varepsilon^2 + 1)^{3/2}}, \quad (7)$$

где $\sigma = \frac{\omega}{\omega_0}$.

Частотная характеристика чувствительности определяется последним множителем выражения (7). Второй множитель является температурным коэффициентом термосопротивления. Первый множитель является отношением $\psi_{\max} = \frac{a_0}{R_0}$, которое, согласно (1), равно максимальному выходному напряжению измерительной цепи при $R_T = 0$.

При $\sigma=1$ будем иметь

$$\left(\frac{d|\psi|}{dT} \right)_{\max} = \psi_{\max} \frac{B}{T_m^2} \frac{\varepsilon^2}{(\varepsilon^2 + 1)^{3/2}}. \quad (8)$$

Подставляя значения a_0 и R_0 в выражение для ψ_{\max} , получим

$$\psi_{\max} = \frac{1}{1 + 2 \left(\frac{C_4}{C_T} + \frac{C_4}{C_T} \frac{C_2}{C_T} + \frac{C_2}{C_T} \right)}. \quad (9)$$

Рассмотрим погрешности измерительной цепи. Основным источником погрешностей измерительной цепи можно считать изменения ее элементов, т. е. емкостей соединительных кабелей и токоъемника, колебания напряжения питания, а также изменения переходного сопротивления подшипников. При исследовании погрешностей измерений принимаем, что элементы цепи будут отличаться от тех, при которых производилась градуировка на заданную величину. Величина отклонения определяется условиями измерений, расположением аппаратуры на машине, выбранными изоляционными материалами, точностью изготовления деталей и т. д. Прежде всего рассмотрим погрешности из-за изменения элементов измерительной цепи, влияющие на коэффициенты a_0 и R_0 в выражении (1). Погрешность коэффициента передачи имеет вид

$$\Delta \psi = \frac{-j \Delta a_0}{R_T - j R_0} + \frac{a_0 \Delta R_0}{(R_T - j R_0)^2}. \quad (10)$$

Абсолютная погрешность по температуре равна изменению коэффициента передачи, деленному на чувствительность измерительной цепи $d\psi/dT$, которая определяется путем дифференцирования выражения (1):

$$\frac{d\psi}{dT} = \frac{-j a_0 R_T}{(R_T - j R_0)^2} \frac{B}{T^2}. \quad (11)$$

Тогда абсолютная погрешность измерения температуры будет равна

$$\Delta T = \frac{\Delta \psi}{\frac{d\psi}{dT}} = \frac{T^2}{B} \xi_a \left[1 + j \frac{R_0}{R_T} \left(\frac{\xi_R}{\xi_a} - 1 \right) \right], \quad (12)$$

где относительные погрешности коэффициентов a_0 и R_0 обозначены как

$$\xi_a = \frac{\Delta a_0}{a_0} \quad \text{и} \quad \xi_R = \frac{\Delta R_0}{R_0}. \quad (13)$$

Фаза приращения коэффициента передачи $\Delta \psi$ из-за изменения элементов цепи не совпадает с фазой чувствительности измерительной цепи, поэтому ΔT — комплексная величина.

Введение комплексной величины погрешности позволяет при заданных одновременных изменениях отдельных элементов цепи определять суммарную ошибку измерений. Сложение модулей будет неправильным, так как фазы приращений коэффициента передачи в случае изменений различных элементов цепи, переход-

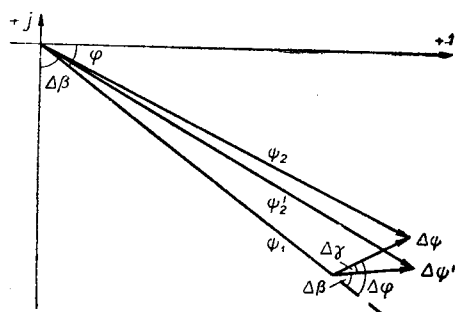


Рис. 3.

ного сопротивления подшипников, измеряемой температуры неодинаковы.

Введем в рассмотрение коэффициент передачи ψ_2 , который соответствует температуре T_2 , но с тем условием, что приращения из-за изменения температуры (сопротивления термистора R_T) и элементов измерительной цепи равны по модулю $|\Delta\psi'| = |\Delta\psi|$. Соответствующая векторная диаграмма приведена на рис. 3. Фазовый угол комплексной погрешности по температуре есть угол между $\Delta\psi$ и $\Delta\psi'$.

В самом деле,

$$\Delta T = \frac{\Delta\psi}{\frac{d\psi}{dT}} = \frac{|\Delta\psi| e^{j(\varphi + \Delta\varphi)}}{\left| \frac{d\psi}{dT} \right| e^{j(\Delta\varphi + \Delta\beta)}} = |\Delta T| e^{j\Delta\gamma}.$$

Таким образом,

$$\operatorname{tg} \Delta\gamma = \frac{R_0}{R_T} \left(\frac{\xi_R}{\xi_a} - 1 \right). \quad (14)$$

При измерении выходного напряжения вольтметром, не чувствительным к фазе, погрешность будет определяться изменением модуля, т. е. разностью $|\psi_2| - |\psi_1|$ (см. рис. 3):

$$\psi_2 = |\psi_1| e^{j\varphi} (1 + |\xi_\psi| e^{j\Delta\varphi}),$$

где $|\xi_\psi| = \frac{|\Delta\psi|}{|\psi_1|}$ — модуль относительного изменения коэффициента передачи.

После преобразований, пренебрегая величиной $|\xi_\psi|^2$ ввиду малости приращений, получим

$$|\psi_2| - |\psi_1| = \Delta\psi \cos \Delta\varphi.$$

Погрешность по температуре при измерении выходного напряжения нефазочувствительным вольтметром равна

$$\Delta T_{\text{мод}} = \frac{|\psi_2| - |\psi_1|}{\frac{d|\psi|}{dT}} = \frac{|\Delta\psi|}{\left| \frac{d\psi}{dT} \right|} \frac{\cos \Delta\varphi}{\cos \Delta\beta} = |\Delta T| \frac{\cos \Delta\varphi}{\cos \Delta\beta}. \quad (15)$$

Определим величины углов выражения (5). Угол φ есть фазовый сдвиг коэффициента передачи, и, согласно (1),

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{R_T}{R_0}; \quad \Delta\varphi = \Delta\beta + \Delta\gamma. \quad (16)$$

Согласно векторной диаграмме, угол $\Delta\beta$ есть фазовый угол отношения $\frac{\Delta\psi'}{\psi_1}$, и

$$\operatorname{tg} \Delta\beta = -\frac{R_0}{R_T}. \quad (17)$$

Так как

$$|\Delta T| = \frac{T^2}{B} \xi_a \sqrt{1 + \frac{R_0^2}{R_T^2} \left(\frac{\xi_R}{\xi_a} - 1 \right)^2} = \frac{T^2}{B} \frac{\xi_a}{\cos \Delta \gamma},$$

то, подставляя это выражение в (15) и заменяя после преобразований тригонометрические функции их значениями, определим

$$\Delta T_{\text{мод}} = \frac{T^2}{B} \xi_a \left(1 - \frac{R_0^2}{R_T^2} \theta \right), \quad (18)$$

где $\theta = \frac{\xi_R}{\xi_a} - 1$.

Далее необходимо найти относительные изменения коэффициентов ξ_a и ξ_R в зависимости от изменения элементов цепи. Учитывая выражение (1а), согласно общей теории ошибок, получим

$$\xi_a = - (\xi_{1a} + \xi_{2a} + \xi_{\omega} + \xi_{C_4}), \quad (19)$$

где ξ_{1a} — относительное изменение величины $1 + \frac{C_2}{C_T}$;

ξ_{2a} — относительное изменение величины $1 + \frac{C_2}{C_T} + \frac{C_2}{C_4}$.

Аналогично для R_0 , согласно (1б), найдем

$$\xi_R = \xi_{1R} - \xi_{C_T} - \xi_{\omega} - \xi_{1a} - \xi_{2a}, \quad (19a)$$

где ξ_{1R} — относительное изменение величины

$$\frac{C_T}{C_4} + 2 \left(1 + \frac{C_2}{C_T} + \frac{C_2}{C_4} \right).$$

Соединительные кабели, проложенные на вращающейся детали, имеют емкости на землю через переходное сопротивление подшипников $R_{\text{п}}$, которое с увеличением скорости может значительно увеличиваться и вносить погрешности. Эквивалентная цепь для этого случая приведена на рис. 4, а. Заменим звезду из C_2 , C_2 и $R_{\text{п}}$ на эквивалентный треугольник и получим цепь, изображенную на рис. 4, б.

Тогда

$$z_{12} = 2x_2 + x_2^2/R_{\text{п}}; \quad z_{13} = x_2 + 2R_{\text{п}};$$

$$z_{23} = x_2 + 2R_{\text{п}}.$$

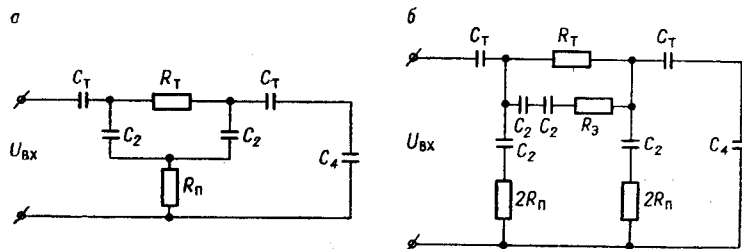


Рис. 4.

Обозначив $\frac{2R_0}{|x_2|} = \lambda$, найдем $z_{23} = x_2(1 + j\lambda)$.

Подставляя значения z_{23} вместо x_2 в выражение (1а) и пренебрегая ввиду малости величинами λ^2 и λ^3 , определим относительное изменение коэффициента a_0 из-за переходного сопротивления подшипников

$$\xi_a = j\lambda x_a,$$

где

$$x_a = 2 - \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C_T}} - \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C_T} + \frac{C_2}{C_4}}. \quad (20)$$

После аналогичных преобразований относительное изменение коэффициента R_0 выразим как

$$\xi_R = j\lambda x_R,$$

где

$$x_R = \frac{1}{1 + \frac{C_T}{C_2}} \frac{1 + \left(1 + \frac{1}{\frac{C_2}{C_T} + \frac{C_2}{C_T} \frac{C_4}{C_T} + \frac{C_4}{C_T}} \right)^2}{2 + \frac{1}{\frac{C_2}{C_T} + \frac{C_2}{C_T} \frac{C_4}{C_T} + \frac{C_4}{C_T}}}. \quad (21)$$

Подставляя полученные выражения в (12), будем иметь

$$\Delta T'_\lambda \frac{T^2}{B} \lambda x_a \left[j + \frac{R_0}{R_T} \left(1 - \frac{x_R}{x_a} \right) \right].$$

Определим погрешность из-за шунтирования термистора сопротивлением z_{12} . Учитывая, что λ не должно превышать нескольких сотых, получим $z_{12} = -\frac{|2x_2|}{\lambda}$; тогда новое сопротивление термистора будет равно $R'_T = R_T \frac{1}{1 - \frac{\lambda}{k_1}}$,

$$\text{где } k_1 = \frac{2|x_2|}{R_T}.$$

Определив приращение $\Delta\psi$ и разделив его на $d\psi/dT$, найдем

$$\Delta T''_\lambda = -\lambda \frac{T^2}{B} \frac{1}{k_1 - \lambda}.$$

Таким образом, для комплексной погрешности из-за переходного сопротивления подшипников будет соответствовать выражение

$$\Delta T_\lambda = \frac{T^2}{B} \lambda x_a \left[j + \frac{R_0}{R_T} \left(1 - \frac{x_R}{x_a} \right) - \frac{1}{(k_1 - \lambda) x_a} \right]. \quad (22a)$$

$$\text{Учитывая, что } \Delta T_{\lambda} = \frac{T^2 \lambda x_a}{B} \frac{1}{\sin \Delta \gamma}$$

$$\text{где } \sin \Delta \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{R_0}{R_T} \left(1 - \frac{x_R}{x_a} \right) - \frac{1}{(k_1 - \lambda)x_a} \right]^2}}$$

окончательно определим

$$\Delta T_{\lambda} = - \frac{T^2}{B} \lambda \left(\frac{R_0}{R_T} x_R + \frac{1}{k_1 - \lambda} \right). \quad (22)$$

Если необходимо учесть погрешности из-за активной проводимости кабелей, следует преобразовать параллельную схему замещения в последовательную, что при малых $\text{tg} \delta$ не изменит величину емкости. Тогда получим цепь, аналогичную изображенной на рис. 4, б, но без шунтирующего термистор сопротивления, и рассчитаем погрешность, как указано выше, но без члена с k .

При больших скоростях вращения переходное сопротивление подшипников может достигать мегаом и вращающаяся деталь оказывается практически изолированной от земли. В этом случае для обеспечения стабильности показаний и сохранения градуировки обязательно заземление вала, причем желательно бесконтактным способом. Для получения малой величины переходного сопротивления и уменьшения габаритов емкостного токосъемника целесообразно заземлить вращающуюся деталь, т. е. шунтировать переходное сопротивление подшипников последовательным колебательным контуром [2]. Индуктивность контура рассчитывается по известной формуле:

$$L_k = \frac{1}{\omega^2 (C_T + C_4)}. \quad (23)$$

Требования к добротности контура, определяющей его сопротивление, зависят от допускаемой погрешности, которая находится по выражению (22).

Абсолютная погрешность по температуре из-за изменения напряжения питания измерительной цепи определяется ее чувствительностью и равна

$$\Delta T_n = \frac{\alpha}{\frac{d|\psi|}{dT}}, \quad (24)$$

где α — относительное изменение напряжения питания.

Для проверки полученных соотношений была собрана из точно подобранных емкостей и сопротивлений эквивалентная схема цепи при $C_2/C_T \approx 2$, а $C_4/C_T \approx 3$. Сопротивления выбирались в соответствии с температурной характеристикой термистора КМТ-14 ($B=4200$, $R_{150^\circ\text{C}} = 5 \text{ ком}$); сравнение величин чувствительности и погрешностей, рассчитанных и измеренных ламповым вольтметром МВЛ-3, дало разницу в пределах 3—8%.

Испытания на экспериментальной установке со скоростью вращения до 36000 об/мин показали работоспособность предложенных измерительных цепей [3].

Из приведенных расчетов следует, что с помощью данного метода возможно измерение температуры вращающихся деталей с погрешностью 3—5% при стабильности элементов цепи 1—2% в широком диапазоне скоростей вращения и температур (последнее зависит в основном от температурного диапазона термисторов). Чувствительность измерений определяется произведением температурного коэффициента термистора на максимальное выходное напряжение измерительной цепи (т. е. при $R_T = 0$), которое зависит от соотношения емкостей измерительной цепи.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Я. Ратновский, Е. С. Кожевникова. Устройство для бесконтактного измерения температуры вращающихся деталей. Авторское свидетельство № 149915. Бюллетень изобретений, 1962, № 17.
2. В. Я. Ратновский. Устройство для бесконтактного измерения температуры вращающихся деталей. Авторское свидетельство № 164990, зависимое от № 149915. Бюллетень изобретений, 1964, № 17.
3. В. Я. Ратновский, Е. С. Кожевникова. Устройство для измерения температуры вращающихся деталей.— Приборостроение, 1965, № 7.

*Поступила в редакцию
2 марта 1965 г.,
окончательный вариант —
16 декабря 1965 г.*