

А. А. МАРЕНИЧ, Н. А. КОСТИН (ДИИТ)

МЕТОД ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОТЯГОВОЙ И ПРОТИВОДЕЙСТВУЮЩЕЙ СИЛ КОНТАКТОРОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Пропонується новий, покращений метод визначення дисперсії нелінійної функції декількох випадкових величин-аргументів у застосуванні до тягової та протидіючої характеристики електромагнітних контакторів рухомого складу. Визначено параметр, що найістотніше впливає на стабільність тягової та протидіючої характеристик електромагнітних клапанних контакторів.

Ключові слова: силові електромагнітні клапанні контактори, рухомий склад, імовірнісна модель, тягова сила, результуюча протидіюча сила

Предлагается новый, более точный метод определения дисперсии нелинейной функции нескольких случайных величин-аргументов в применении к тяговой и противодействующей характеристикам электромагнитных контакторов подвижного состава. Определен параметр, наиболее существенно влияющий на стабильность тяговой и противодействующей характеристик электромагнитных клапанных контакторов.

Ключевые слова: силовые электромагнитные клапанные контакторы, подвижной состав, вероятностная модель, тяговая сила, результирующая противодействующая сила

The new improved method of determination of the nonlinear function of several random variables-arguments as applied to traction and counteracting characteristics of the rolling stock electromagnetic contactors is proposed. A parameter which has the most substantial influence on the stability of traction and counteracting characteristics of the electromagnetic valve contactors is determined.

Keywords: power electromagnetic valve contactors, rolling stock, probabilistic model, tractive force, resulting counteracting force

Введение

Как известно [1 – 3], силовые контакторы, как и любое другое устройство подвижного состава, рассчитывают на номинальные физические и электрические параметры. Однако реальные значения этих параметров на действующих контакторах всегда в большей или меньшей мере отличаются от номинальных данных. Возникновение этих различий (отклонений), называемых нестабильностью параметров, имеет место как уже при изготовлении контактора на заводе или после его ремонта (технологическая стабильность), так и в процессе эксплуатации контактора (эксплуатационная стабильность). Указанные нестабильности параметров контактора обуславливают также нестабильность возникающих в нем силы электромагнитного притяжения (электротяговой) Q_M и противодействующей силы $Q_{П}$, соотношение между которыми определяет работоспособность контактора по критерию факта его нормального замыкания (включения, притяжения якоря к сердечнику). Кроме этого, решение задачи оценки технологической стабильности сил Q_M и $Q_{П}$ является необходимой также по следующим причинам. Во-первых,

важно численно определить собственные отклонения (нестабильность) параметров, от которых зависит сила, что позволяет установить, какой из них оказывает наибольшее влияние на полный разброс (нестабильность) этой силы с целью отыскания способов эффективного воздействия на этот параметр. Во-вторых, необходимо установить существующий диапазон численного отклонения (нестабильности) указанной силы от номинальных данных, что даст возможность определить граничные допуски на параметры (собственные допуски), а, следовательно, оценить и граничные значения полного допуска (на силу). Имея обоснованные нормы допусков и функциональные зависимости между ними и строго придерживаясь их при изготовлении или ремонте контактора, можно достичь необходимой стабильности сил и их характеристик (тяговой и противодействующей), а, следовательно, повышения работоспособности контактора.

В задачах оценки стабильности любого параметра, величины или функции последние имеют случайный характер, поэтому такие задачи решают вероятностно-статистическими методами. [4, 5], в основе которых лежит нахождение дисперсии или среднеквадратического

отклонения исследуемого параметра, величины или, что в общем случае чаще всего, некоторой функции вида:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n), \quad (1)$$

где X_1, X_2, \dots, X_n – система случайных величин – аргументов.

В настоящее время существуют два способа определения дисперсии D_y функции Y как меры стабильности, отклонений относительно своего математического ожидания, функции (1). Первый метод – точный, предполагающий знание, согласно функции (1), плотности вероятности распределения $\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ системы случайных величин (X_1, X_2, \dots, X_n) и позволяющий найти дисперсию D_y по формуле [4, 5]:

$$D_y = D[Y] = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} [f(x_1, x_2, \dots, x_n) - m_y]^2 \times \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 \cdot dx_2 \dots dx_n, \quad (2)$$

где m_y – математическое ожидание исследуемой функции Y ;

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – аналитическое выражение функции (1).

Вычисление дисперсии по (2) часто практически трудновыполнимо, т.к. способы отыскания и, собственно, сам закон распределения $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ сложны [4, 5], к тому же функция $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ нередко бывает нелинейной, что еще в большей степени усложняет поставленную задачу.

Второй метод определения дисперсии $D_y = D[Y]$ базируется на разложении функции $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ в ряд Тейлора с последующим использованием теорем о числовых характеристиках функций произвольного числа случайных аргументов [5, с. 183]. В [6, 7] этот метод использован для оценки стабильности характеристик электровозов, в [8] – для силовых контактных соединений электропневматических контакторов электроподвижного состава, а в [9] – для получения относительного отклонения дополнительного поперечного тока коммутации тяговых двигателей. Однако в указанных работах [6 – 9] этот метод использован только как метод линеаризации функции $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, т.е. в ряде Тейлора для этой функции авторы ограничивались толь-

ко первыми двумя, следовательно, линейными членами. В этом случае формула для дисперсии D_y функции (1) будет иметь простой вид:

$$D_y = D[Y] = \sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \Bigg|_{x_i=m_{x_i}} \cdot \sigma_{x_i}^2. \quad (3)$$

Однако эта формула (3) в общем случае дает очень неточные приближенные результаты вычисления дисперсии, что обусловлено следующим. Во-первых, нередко функция $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ является существенно нелинейной и рассматривается во всем диапазоне изменения ее аргументов, тогда эта функция линеаризации не подлежит. Во-вторых, диапазоны изменения случайных аргументов – параметров X_1, X_2, \dots, X_n бывают часто не настолько малы, чтобы в их пределах можно линеаризовать функцию $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ с достаточной точностью. В-третьих, случайные аргументы X_1, X_2, \dots, X_n принимались авторами работ [6 – 9] независимыми и некоррелированными. Наконец, для определения D_y использованы упрощенные формулы для случая, когда случайные аргументы X_K функции Y распределены только по закону Гаусса.

Учитывая вышеизложенное, а также в развитие и уточнение метода, использованного в работах [6 – 9], ниже предложен новый, более точный, метод определения дисперсии функции нескольких случайных величин – аргументов и тем самым оценки стабильности указанной функции. С этой целью изложим теоретические аспекты нового метода на примере обеих сил контактора: электромагнитного притяжения (тяговой) Q_M и противодействующей Q_{II} , обозначив их вначале, ради обобщения последующего изложения, одной общей функцией вида:

$$Q = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n), \quad (4)$$

где X_1, X_2, \dots, X_n – случайные величины – аргументы, от которых зависят силы.

Теоретические предпосылки нового метода

Разложим в общем случае существенно нелинейную функцию (4) в функциональный ряд Тейлора в окрестностях точек $(m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_i}, \dots, m_{x_n})$, сохранив при

этом не два (как в существующем методе линеаризации), а четыре члена, т.е. оставим также третий и четвертый члены, являющиеся членами высшего порядка малости. Тогда функция (4) может быть записана в виде:

$$Q = f(m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_i}, \dots, m_{x_n}) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Big|_{x_i=m_{x_i}} \cdot (X_i - m_{x_i}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \right) \Big|_{x_i=m_{x_i}} \cdot (X_i - m_{x_i})^2 + \sum_{i < k} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_k} \right) \Big|_{\substack{x_i=m_{x_i} \\ x_k=m_{x_k}}} \cdot (X_i - m_{x_i})(X_k - m_{x_k}), \quad (5)$$

где индексы $x_i = m_{x_i}$, $x_k = m_{x_k}$ обозначают, что в выражении частной производной вместо текущих значений x_i и x_k случайных аргументов X_i и X_k подставлены их математические ожидания m_{x_i} и m_{x_k} ;

знак $i < k$ под суммой в четвертом слагаемом обозначает, что суммирование распространяется на все возможные попарные сочетания случайных величин $(X_1, X_2, \dots, X_i, X_k, \dots, X_n)$.

Применяя к выражению (5) известную из [5, с. 223] операцию математического ожидания, получим математическое ожидание функции силы Q :

$$M[Q] = M_Q = f(m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_n}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \right) \Big|_{x_i=m_{x_i}} \cdot D_{x_i} + \sum_{i < k} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_k} \right) \Big|_{\substack{x_i=m_{x_i} \\ x_k=m_{x_k}}} \cdot R_{ik}, \quad (6)$$

где R_{ik} – корреляционный момент случайных величин X_i и X_k .

Аналогично, применяя к выражению (5) операцию определения дисперсии [5, с. 222], получим формулу дисперсии функции силы:

$$D[Q] = D_Q = \sigma_Q^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Big|_{x_i=m_{x_i}}^2 \cdot D_{x_i} + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \right) \Big|_{x_i=m_{x_i}}^2 \cdot (\mu_4[X_i] - D_{x_i}^2) +$$

$$+ \sum_{i < k} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_k} \right) \Big|_{\substack{x_i=m_{x_i} \\ x_k=m_{x_k}}}^2 \cdot D_{x_i} \cdot D_{x_k} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Big|_{x_i=m_{x_i}} \cdot \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \right) \Big|_{x_i=m_{x_i}} \cdot \mu_3[X_i], \quad (7)$$

где D_{x_i} , D_{x_k} – дисперсии случайных величин-аргументов X_i и X_k ;

$\mu_3[X_i]$ и $\mu_4[X_i]$ – третий и четвертый моменты распределения случайной величины X_i .

Если случайные величины-аргументы $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ функции (4) распределены по закону Гаусса, для которого $\mu_3[X_i] = 0$, а $\mu_4[X_i] = 3D_{x_i}^2$, то выражение (7) для дисперсии функции силы Q упрощается и принимает вид:

$$D[Q] = D_Q = \sigma_Q^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Big|_{x_i=m_{x_i}}^2 \cdot D_{x_i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \right) \Big|_{x_i=m_{x_i}}^2 \cdot D_{x_i}^2 + \sum_{i < k} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_k} \right) \Big|_{\substack{x_i=m_{x_i} \\ x_k=m_{x_k}}}^2 \cdot D_{x_i} D_{x_k}. \quad (8)$$

Второе, третье и четвертое слагаемые в формуле (7), а также второе и третье – в выражении (8) учитывают нелинейность функции (4) при ее разложении в ряд Тейлора.

Оценка стабильности силы электромагнитного притяжения контактора

Используя полученные выше формулы (7) и (8) для дисперсии, оценим и проанализируем стабильность тяговой силы Q_M силовых контакторов как функции нескольких переменных величин.

Считая, что распределение магнитной индукции по площади торца сердечника равномерное, что поверхности якоря и сердечника параллельны и находятся на небольшом расстоянии друг от друга, а также то, что магнитный поток рассеяния сердечника незначителен по сравнению с рабочим потоком, выражение силы электромагнитного притяжения Q_M контактора можно принять в виде формулы Максвелла [2, 10, 11]:

$$Q_M = 0,5\mu_0 S_\delta \left(\frac{F}{\delta} \right)^2 = 0,5\mu_0 S_\delta \left(\frac{U}{R_K} \cdot \frac{W}{\delta} \right)^2 =$$

$$= 0,5\mu_0 S_T \left(1 + \frac{2\delta}{\sqrt{S_T}} \right) \left(\frac{U}{R_K} \cdot \frac{W}{\delta} \right)^2, \quad (9)$$

где Q – сила тяги электромагнита, Н;

$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная;

S_δ – площадь сечения воздушного зазора, м²;

S_T – площадь поверхности торца сердечника, м²;

$F = IW$ – магнитодвижущая сила, А;

$I = \frac{U}{R_K}$ – ток в катушке, А;

U – напряжение в цепях управления, В;

R_K – сопротивление включающей катушки;

W – число витков катушки электромагнита;

где;

δ – воздушный зазор между якорем и сердечником.

Обозначив постоянной величиной C выражение $0,5\mu_0 W^2 = C$, перепишем формулу (9) в виде:

$$Q_M = C \frac{U^2 S_T}{R_K^2 \cdot \delta^2} + 2C \frac{U^2 \sqrt{S_T}}{R_K^2 \cdot \delta}. \quad (10)$$

В выражении (10) величины U , S_T , R_K и δ являются случайными, следовательно, Q_M является функцией системы случайных величин вида (4) и поэтому для нахождения дисперсии силы Q_M , т.е. для оценки ее стабильности, применима полученная выше формула (7). А, учитывая, что величины U , S_T , R_K , δ распределены по нормальному закону, тогда для нахождения дисперсии применим формулу (8). Для этого получим частные производные различного порядка от функции (10) по величинам-параметрам U , S_T , R_K и δ . С точки зрения работоспособности нас интересует значение Q_M при $\delta = \delta_{кр}$ и ее соотношение со значением противодействующей силы при этом зазоре. Критический зазор $\delta_{кр}$ – это зазор между якорем и сердечником в момент соприкосновения главных контактов.

В частности, частные производные первого порядка:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q_M}{\partial U} &= 2C \frac{\bar{U} \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^2} + 4C \frac{\bar{U} \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}}; \\ \frac{\partial Q_M}{\partial S_T} &= C \frac{\bar{U}^2}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^2} + C \frac{\bar{U}^2}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta} \cdot \sqrt{\bar{S}_T}}; \\ \frac{\partial Q_M}{\partial R_K} &= -2C \frac{\bar{U}^2 \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^3 \cdot \bar{\delta}^2} - 4C \frac{\bar{U}^2 \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^3 \cdot \bar{\delta}}; \\ \frac{\partial Q_M}{\partial \delta} &= -2C \frac{\bar{U}^2 \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^3} - 2C \frac{\bar{U}^2 \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Частные производные второго порядка:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 Q_M}{\partial U^2} &= 2C \frac{\bar{S}_T}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^2} + 4C \frac{\sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}}; \\ \frac{\partial^2 Q_M}{\partial S_T^2} &= -C \frac{\bar{U}^2}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta} \cdot 2\sqrt{\bar{S}_T}}; \\ \frac{\partial^2 Q_M}{\partial R_K^2} &= 6C \frac{\bar{U}^2 \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^4 \cdot \bar{\delta}^2} + 12C \frac{\bar{U}^2 \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^4 \cdot \bar{\delta}}; \\ \frac{\partial^2 Q_M}{\partial \delta^2} &= 6C \frac{\bar{U}^2 \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^4} + 4C \frac{\bar{U}^2 \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^3}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Частные смешанные производные:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 Q_M}{\partial U \partial S_T} &= 2C \frac{\bar{U}}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^2} + 2C \frac{\bar{U}}{\bar{R}_K^2 \bar{\delta} \sqrt{\bar{S}_T}}; \\ \frac{\partial^2 Q_M}{\partial U \partial R_K} &= -4C \frac{\bar{U} \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^3 \cdot \bar{\delta}^2} - 8C \frac{\bar{U} \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^3 \cdot \bar{\delta}}; \\ \frac{\partial^2 Q_M}{\partial U \partial \delta} &= -4C \frac{\bar{U} \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^3} - 4C \frac{\bar{U} \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^2}; \\ \frac{\partial^2 Q_M}{\partial S_T \partial R_K} &= -2C \frac{\bar{U}^2}{\bar{R}_K^3 \cdot \bar{\delta}^2} - 2C \frac{\bar{U}^2}{\bar{R}_K^3 \bar{\delta} \sqrt{\bar{S}_T}}; \\ \frac{\partial^2 Q_M}{\partial S_T \partial \delta} &= -2C \frac{\bar{U}^2}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^3} - 1C \frac{\bar{U}^2}{\bar{R}_K^2 \bar{\delta}^2 \sqrt{\bar{S}_T}}; \\ \frac{\partial^2 Q_M}{\partial R_K \partial \delta} &= 4C \frac{\bar{U}^2 \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^3 \cdot \bar{\delta}^3} + 4C \frac{\bar{U}^2 \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^3 \cdot \bar{\delta}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Сложив, согласно выражению (8), системы формул (11), (12) и (13), получим искомое выражение дисперсии тяговой силы контактора:

$$D_{Q_M} = D[f(U, S_T, R_K, \delta)] = \left[2C \frac{\bar{U} \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^2} + 4C \frac{\bar{U} \cdot \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}} \right]^2 D_U + \left[C \frac{\bar{U}^2}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^2} + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + C \frac{\bar{U}^2}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta} \sqrt{\bar{S}_T}} \Big]^2 \cdot D_{S_T} + \left[-2C \frac{\bar{U}^2 \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^3 \cdot \bar{\delta}^2} - \right. \\
& \left. - 4C \frac{\bar{U}^2 \cdot \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^3 \cdot \bar{\delta}} \right]^2 \cdot D_{R_K} + \left[-2C \frac{\bar{U}^2 \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^3} - \right. \\
& \left. - 2C \frac{\bar{U}^2 \cdot \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^2} \right]^2 \cdot D_{\delta} + \frac{1}{2} \left\{ \left[2C \frac{\bar{S}_T}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^2} + \right. \right. \\
& \left. \left. + 4C \frac{\sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}} \right]^2 \cdot D_U^2 + \left[-C \frac{\bar{U}^2}{2\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta} \sqrt{\bar{S}_T}} \right]^2 \cdot D_{S_T}^2 + \right. \\
& \left. + \left[6C \frac{\bar{U}^2 \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^4 \cdot \bar{\delta}^2} + 12C \frac{\bar{U}^2 \cdot \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^4 \cdot \bar{\delta}} \right]^2 \cdot D_{R_K}^2 + \right. \\
& \left. + \left[6C \frac{\bar{U}^2 \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^4} + 4C \frac{\bar{U}^2 \cdot \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^3} \right]^2 \cdot D_{\delta}^2 \right\} + \\
& + \left[2C \frac{\bar{U}}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^2} + 2C \frac{\bar{U}}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta} \sqrt{\bar{S}_T}} \right]^2 \cdot D_U \cdot D_{S_T} + \\
& + \left[-4C \frac{\bar{U} \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^3 \cdot \bar{\delta}^2} - 8C \frac{\bar{U} \cdot \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^3 \cdot \bar{\delta}} \right]^2 \cdot D_U \cdot D_{R_K} + \\
& + \left[-4C \frac{\bar{U} \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^3} - 4C \frac{\bar{U} \cdot \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^2} \right]^2 \cdot D_U \cdot D_{\delta} + \\
& + \left[-2C \frac{\bar{U}^2}{\bar{R}_K^3 \cdot \bar{\delta}^2} - 2C \frac{\bar{U}^2}{\bar{R}_K^3 \cdot \bar{\delta} \sqrt{\bar{S}_T}} \right]^2 \cdot D_{S_T} \cdot D_{R_K} + \\
& + \left[-2C \frac{\bar{U}^2}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^3} - C \frac{\bar{U}^2}{\bar{R}_K^2 \cdot \bar{\delta}^2 \sqrt{\bar{S}_T}} \right]^2 \cdot D_{S_T} \cdot D_{\delta} + \\
& + \left[4C \frac{\bar{U}^2 \cdot \bar{S}_T}{\bar{R}_K^3 \cdot \bar{\delta}^3} + 4C \frac{\bar{U}^2 \cdot \sqrt{\bar{S}_T}}{\bar{R}_K^3 \cdot \bar{\delta}^2} \right]^2 \cdot D_{R_K} \cdot D_{\delta}. \quad (14)
\end{aligned}$$

Численные примеры

В результате обработки статистических данных по замеру значений параметров-аргументов U , S_T , R_K и δ получено:

$$\bar{U} = 37 \text{ В}; D_U = 9,18 \text{ В}; \bar{S}_T = 969,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$D_{S_T} = 47,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}^4; \bar{R}_K = 61,9 \text{ Ом};$$

$$D_{R_K} = 3,41 \text{ Ом}; \delta = \delta_{\text{кр}} = 3,24 \cdot 10^{-3};$$

$$D_{\delta} = 0,29 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; C = 1,471;$$

$$\delta = \delta_{\text{кр}} = \delta_2 \text{ (рис. 1).}$$

Доказано, что все случайные величины-аргументы функции $Q_M = f(U, S_T, R_K, \delta)$ распределены по нормальному закону.

Расчет по (14) дал следующий результат:

$$\begin{aligned}
D_{Q_M} = & 92,25 + 0,145 + 12,31 + 317,09 + \\
& + 2,43 + 7,39 \cdot 10^{-12} + 0,05 + 36,9 + 0,004 + 1,2 + \\
& + 8,93 + 0,0005 + 0,0145 + 1,2 = 472,524 \text{ Н}^2.
\end{aligned}$$

Первые четыре слагаемые ($92,25 + 0,145 + 12,31 + 317,09 = 421,795$) соответствуют первым четырем слагаемым в формуле (14). Эти слагаемые определяют дисперсию рассматриваемой функции при допущении, что функция $Q_M = f(U, S_T, R_K, \delta)$ – нелинейная.

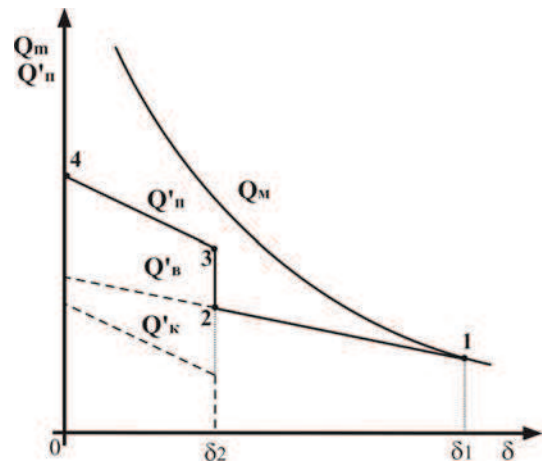


Рис. 1. Тяговая и противодействующая характеристики электромагнитного контактора, $\delta_1 = \delta_{\text{отп}}$, $\delta_2 = \delta_{\text{кр}}$

Наибольшее слагаемое (317,09) обусловлено нестабильностью критического воздушного зазора между якорем и сердечником контактора в процессе эксплуатации. Обратим внимание, что это слагаемое значительно больше остальных трех. Последующие десять слагаемых, сумма которых равна 50,729, представляют собой «поправку на нелинейность функции Q_M ». Наибольшее из них (36,9) соответствует восьмому слагаемому в формуле (14), в нем также фигурирует дисперсия критического воздушного зазора.

Ошибка в определении дисперсии рассматриваемой функции, если не учитывать ее нелинейность, составляет:

$$\frac{472,524 - 421,795}{421,795} \cdot 100\% = 12,09\%.$$

Расхождение в 12,09 % при определении дисперсии существенно и подтверждает целесообразность применения предложенного авторами точного метода (с учетом нелинейности функции).

Полученные результаты показывают, что для обеспечения стабильности тяговой характеристики контактора необходимо обеспечить в эксплуатации, в первую очередь, максимально возможную стабильность критического воздушного зазора.

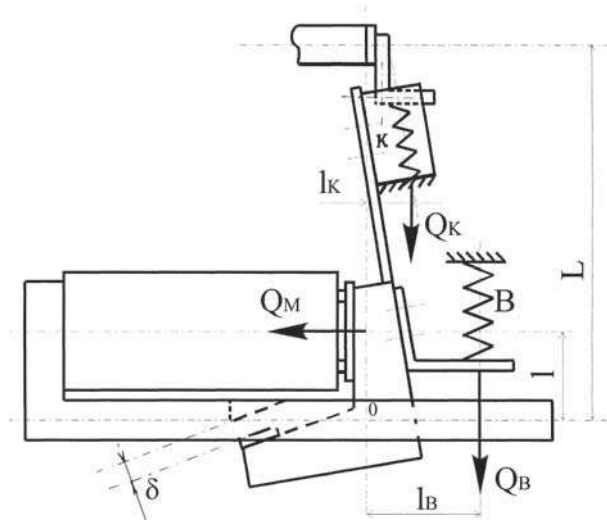


Рис. 2. Кинематическая схема контактора МК-310Б

Результирующая противодействующая сила Q_{Π}' , приведенная к оси действия силы Q_M (точка 0 на рис. 2), определяется из суммы моментов ее составляющих относительно плеча l . Если пренебречь действием силы тяжести G подвижной части, то:

$$\begin{aligned} Q_{\Pi}' &= A + Q_B \frac{l_B}{l} + Q_K \frac{l_K}{l} = \\ &= A + C_B K \frac{l_B}{l} + C_K \Delta X_K \frac{l_K}{l}, \end{aligned} \quad (15)$$

где C_B , C_K – жесткость контактной и отключающей пружин соответственно;

$K = \delta_{\text{отп}} - \delta_{\text{кр}}$ ($\delta_{\text{отп}}$ – зазор между якорем и сердечником в отпущенном состоянии);

ΔX_K – начальное (до соприкосновения главных контакторов) сжатие контактной пружины.

Q_B , Q_K – силы выключающей и контактной пружин соответственно;

l , l_B , l_K – плечи действия сил Q_M , Q_B , Q_K соответственно;

A – электромагнитная сила при зазоре в отпущенном состоянии якоря $\delta_{\text{отп}} = \delta_1$.

Функция Q_{Π}' – линейная.

Таким образом, согласно (8), принимаем во внимание только первую сумму:

$$\begin{aligned} D(Q_{\Pi}') &= D_{Q_{\Pi}'} = \sigma_{Q_{\Pi}'}^2 = \left(\frac{\partial Q_{\Pi}'}{\partial C_B} \right)^2 D_{C_B} + \\ &+ \left(\frac{\partial Q_{\Pi}'}{\partial K} \right)^2 D_K + \left(\frac{\partial Q_{\Pi}'}{\partial C_K} \right)^2 D_{C_K} + \left(\frac{\partial Q_{\Pi}'}{\partial (\Delta X_K)} \right)^2 D_{\Delta X_K}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{\partial Q_{\Pi}'}{\partial C_B} = K \frac{l_B}{l}; \quad \frac{\partial Q_{\Pi}'}{\partial K} = C_B \frac{l_B}{l};$$

$$\frac{\partial Q_{\Pi}'}{\partial C_K} = \Delta X_K \frac{l_K}{l}; \quad \frac{\partial Q_{\Pi}'}{\partial (\Delta X_K)} = C_K \frac{l_K}{l}. \quad (17)$$

Согласно (16):

$$\begin{aligned} D(Q_{\Pi}') &= D[f(C_B, K, C_K, \Delta X_K)] = \\ &= \left(K \frac{l_B}{l} \right)^2 D_{C_B} + \left(C_B \frac{l_B}{l} \right)^2 D_K + \\ &+ \left(\Delta X_K \frac{l_K}{l} \right)^2 D_{C_K} + \left(C_K \frac{l_K}{l} \right)^2 D_{\Delta X_K}. \end{aligned} \quad (18)$$

В результате обработки статистических данных по замеру значений параметров-аргументов C_B , K , C_K , ΔX_K было получено:

$$\bar{C}_B = 0,963; \quad D_{C_B} = 0,0003; \quad \bar{K} = 8,49;$$

$$D_K = 1,69; \quad \bar{C}_K = 3,15; \quad D_{C_K} = 0,002;$$

$$D_{\Delta X_K} = 0,1456; \quad l_B = 73;$$

$$l = 63; \quad l_K = 26.$$

Все линейные размеры даны в мм.

Расчет по (18) дал следующий результат:

$$\begin{aligned} D(Q_{\Pi}') &= \left(8,49 \cdot \frac{73}{63} \right)^2 \cdot 0,0003 + \left(0,963 \cdot \frac{73}{63} \right)^2 \cdot 1,69 + \\ &+ \left(3,38 \cdot \frac{26}{63} \right)^2 \cdot 0,002 + \left(3,15 \cdot \frac{26}{63} \right)^2 \cdot 0,1456 = \\ &= 0,029 + 2,1 + 0,0039 + 0,246 = 2,38 \text{ Н}^2. \end{aligned}$$

Наибольшее слагаемое (2,1) обусловлено нестабильностью параметра $K = \delta_{\text{кр}} - \delta_{\text{отп}}$, т.е.

для обеспечения стабильности противодействующей характеристики необходимо обеспе-

чить в эксплуатации, в первую очередь, максимально возможную стабильность параметра K .

Обратим внимание, что параметр K зависит от значения параметра $\delta = \delta_{кр}$. При эксплуатации контактора после ремонта до очередного ремонта $\delta_{отп} = const$. Поэтому стабильность и противодействующей характеристики зависит в основном от максимально возможной стабильности $\delta_{кр}$.

Выводы

1. Предлагаемый новый, более точный, метод определения дисперсии нелинейной функции нескольких случайных величин-аргументов в применении к тяговой характеристике электромагнитных контакторов локомотивов уточняет результат до 12 %.

2. Стабильность критического зазора наиболее существенно влияет на стабильность тяговой и противодействующей характеристик электромагнитных клапанных контакторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ДСТУ 2773-94. Апарати електричні тягові. Загальні технічні умови [Текст]. – 82 с.
2. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические аппараты [Текст] / Д. Д. Захарченко. – М.: Транспорт, 1991. – 247 с.
3. Тягові електричні апарати контактні [Текст] / Л. В. Дубинець [та ін.]. – Д.: Нова ідеологія, 2002. – 104 с.

4. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики [Текст] / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
5. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
6. Исаев, И. П. Стабильность характеристик электрических локомотивов [Текст] / И. П. Исаев. – М.: Трансжелдориздат, 1956. – 120 с.
7. Исаев, И. П. Методика анализа неустойчивости силовых полупроводниковых вентилях [Текст] / И. П. Исаев, Д. П. Брунштейн // Электричество. – 1964. – № 12. – С. 23-28.
8. Баб'як, М. О. Підвищення надійності силових контактних з'єднань електропневматичних контакторів електровозів постійного струму [Текст] / М. О. Баб'як // Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 – Електротранспорт. – Д.: ДНУЗТ, 2003. – 21 с.
9. Шаповалов, А. В. Підвищення працездатності тягових двигунів електровозів [Текст] / А. В. Шаповалов / Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 – Електротранспорт. – Д.: ДНУЗТ, 2010. – 20 с.
10. Основы теории электрических аппаратов [Текст] / Б. К. Буль [и др.]. – М.: Высш. шк., 1970. – 600 с.
11. Тихменев, Б. Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог [Текст] / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1991. – 471 с.

Поступила в редколлегию 14.12.2010.

Принята к печати 29.12.2010.