

$$s_{кр} = \pm \frac{R_2''}{Z_k \pm R_2''}. \quad (14)$$

Положительный знак в (14) относится к режиму двигателя, отрицательный – к режиму генератора. Найдены их числовые значения по параметрам схемы замещения двигателя 4А100S 4: $s_{кр1} = +0,18$ и $s_{кр2} = -0,27$, что отражается на характере зависимости q_{2s} (кривая 5 на рис. 3).

В заключение отметим, что представленную в статье М-образную схему замещения, выраженную в виде проводимостей фазы АМ, не следует рас-

смаивать как схему, полностью заменяющую Г-образную; она лишь дополняет известную схему, позволяет получить новые характеристики АМ, особенно при переводе ее в режим генератора.

[26.04.12]

Автор: Носков Виталий Александрович окончил в 1967 г. Челябинский политехнический институт. В 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование электромеханической передачи с отбором мощности от теплового двигателя». Заведующий кафедрой «Электрические машины» ФГБОУ ВПО «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия».

* * *

К расчету интегральных характеристик тока и момента тягового электропривода с контактной сетью¹

МАЛИНИН Л.И., НЕЙМАН В.Ю.

Изложены теоретические аспекты определения энергетических характеристик тяговых электроприводов постоянного тока с контактной сетью. Обоснован метод эквивалентирования переменного сопротивления контактной сети. Показано, что при наличии в приводе переменных во времени сопротивлений понятие действующего и среднеквадратичного значений тока различаются для динамических режимов движения. Мгновенные и интегральные характеристики момента рассмотрены с учетом собственного поля якоря и влияния контактной сети.

Ключевые слова: тяговый электропривод, постоянный ток, контактная сеть, эквивалентные сопротивления, интегральные характеристики тока и момента

Актуальная задача энергосбережения на электрическом транспорте требует повышения точности математических моделей электрооборудования и определения их параметров и характеристик. Одна из основных особенностей транспортного тягового привода, в отличие от общепромышленного, заключается в наличии в цепи переменного во времени сопротивления контактной сети. Расчет подобных цепей является наиболее сложной задачей теории электрических цепей. При распространении общепринятых понятий и определений теории цепей с постоянными параметрами на указанные цепи в каждом конкретном случае требуются дополнительные исследования.

Учет вероятностного характера процессов в транспортной системе возможен только на основе

The theoretical aspects of determining the power performance characteristics of traction DC electric drives powered from a contact system are described. A method for modeling the variable resistance of a contact system is substantiated. It is shown that if a drive contains time-variable resistances, the notions of effective and rms values of current differ from each other for dynamic modes of motion. The instantaneous and integral characteristics of torque are considered taking into account the armature's own field and the effect of the contact system.

Key words: traction electric drive, direct current, contact system, equivalent resistances, integral characteristics of current and torque

функциональных зависимостей, полученных для детерминированного процесса. При решении задач энергосбережения предпочтительным является прямой критерий энергосбережения в виде электрических потерь при обработке одинаковой диаграммы нагрузочного момента, что требует определения токов и моментов, а также их средних и действующих значений при наличии в цепи переменного во времени сопротивления контактной сети.

В статье определяются интегральные характеристики тока (действующего и среднеквадратичного значений), рассматривается эквивалентирование переменных во времени сопротивлений, а также находится среднее значение момента за время движения тягового привода, т.е. приводится корректное обоснование теоретических основ определения энергетических характеристик тяговых приводов

¹ В порядке обсуждения. – *Ред.*

постоянного тока с контактной сетью. Движение указанного привода, как правило, состоит из участков установившегося движения (режим постоянства скорости) и участков, соответствующих равноускоренному движению и торможению. В общем случае ЭДС движения тягового двигателя постоянного тока последовательного возбуждения (ДПВ)

$$e(t) = c\Phi(t)\omega(t) = c\alpha(i)i(t)\frac{\mu v(t)}{r_k} = k_i i(t)v(t),$$

где c – конструктивная постоянная ДПВ; $\alpha(i)$ – коэффициент пропорциональности между потоком Φ и током i ; μ – передаточное число трансмиссии; r_k – радиус колеса; $k_i = c\alpha(i)\mu / r_k$; $v(t)$ – скорость перемещения.

Если магнитная система ДПВ не насыщена, то коэффициент k_i постоянен. Пренебрегая напряжением самоиндукции, при условии одной транспортной единицы в пределах секции контактной сети мгновенное значение тока тягового привода определяется как

$$i = \frac{U(t)}{R_\Sigma + R_k[x(t)] + k_1 v(t)} = i[t, v(t), x(t)],$$

где $U(t)$ – напряжение цепи постоянного тока тяговой подстанции; R_Σ – сумма всех постоянных сопротивлений цепи; $x(t)$ – перемещение транспортной единицы со скоростью $v(t)$; $R_k[x(t)]$ – сопротивление участка секции контактной сети.

В случае ДПВ с насыщенной магнитной системой ($\Phi = \text{const}$)

$$e(t) = \frac{c\Phi\mu v(t)}{r_k} = k_2 v(t),$$

где $k_1 = c\Phi\mu / r_k = \text{const}$.

Мгновенное значение тока тягового привода

$$i = \frac{U(t) - k_2 v(t)}{R_\Sigma + R_k[x(t)]} = i[t, v(t), x(t)].$$

По функциональной зависимости рассмотренные выше случаи равнозначны. Поэтому в дальнейшем ограничимся последним выражением для мгновенного тока привода.

Средняя мощность тепловых потерь в контактной сети. Эквивалентное сопротивление участка секции. Для контактной сети закон Джоуля имеет вид

$$p(t) = i^2(t)R_k(t),$$

где $p(t)$ – мгновенное значение тепловой мощности; $R_k(t)$ – мгновенное значение сопротивления участка секции.

Средняя мощность за время движения $T_{\text{дв}}$ при постоянном токе $i(t) = I$

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T_{\text{дв}}} \int_0^{T_{\text{дв}}} i^2(t)R_k(t)dt = I^2 \frac{1}{T_{\text{дв}}} \int_0^{T_{\text{дв}}} R_k(t)dt = I^2 R_{\text{экв}},$$

где $R_{\text{экв}} = \text{const}$ – эквивалентное сопротивление участка секции l , пройденного за время движения:

$$R_{\text{экв}} = \frac{1}{T_{\text{дв}}} \int_0^{T_{\text{дв}}} R_k[x(t)]dt = \frac{1}{l} \int_0^l \frac{R_k(x)}{v^*(x)} dx, \quad (1)$$

где $l = \int_0^{T_{\text{дв}}} v(t)dt = v_{\text{ср}} T_{\text{дв}}$; $v(x)$ определяется зависимо-

стями $v(t)$ и $x(t)$; $v^*(x) = v(x) / v_{\text{ср}}$. Здесь для упрощения принято, что $x=0$ при $t=0$.

Выражение (1) характеризует корректный способ эквивалентирования переменного во времени сопротивления при использовании понятия действующего значения тока. Для лучшего физического восприятия рассмотрим конкретный пример, полагая удельное сопротивление r_0 контактной сети постоянным. В этом случае

$$R_{\text{экв}} = \frac{1}{T_{\text{дв}}} \int_0^{T_{\text{дв}}} r_0 x(t)dt = \frac{r_0}{T_{\text{дв}}} \int_0^{T_{\text{дв}}} \left(\int_0^l v(t)dt \right) dt. \quad (2)$$

Неоднократное интегрирование (2) по частям позволяет выявить зависимость $R_{\text{экв}} = r_0 l / 2$ от параметров механического движения: пройденного пути l , скорости v и ускорения a :

$$R_{\text{экв}} = r_0 \left[l - \frac{v(T_{\text{дв}})}{2} T_{\text{дв}} + \frac{a(T_{\text{дв}})}{6} T_{\text{дв}}^2 - \frac{1}{T_{\text{дв}}} \int_0^{T_{\text{дв}}} \frac{da}{dt} \frac{t^3}{6} dt \right].$$

Так для установившегося (стационарного) режима ($v = \text{const}$, $dv/dt = 0$) значение $R_{\text{экв}} = r_0 l / 2$, а для динамического (нестационарного) режима ($a = \text{const}$, $da/dt = 0$) $R_{\text{экв}} = r_0 l / 3$.

Для стационарного режима из выражения (1) (при $v = \text{const}$ и $v^*(x) = 1$) следует:

$$R_{\text{экв}} = \frac{1}{T_{\text{дв}}} \int_0^{T_{\text{дв}}} R_k[x(t)]dt = \frac{1}{l} \int_0^l R_k(x)dx,$$

т.е. среднее значение $R_{\text{экв}}$ по времени равно среднему значению по множеству, что и должно выполняться в стационарном процессе. Нетрудно видеть, что использование $R_{\text{экв}}$ для динамического режима с $a = \text{const}$ приводит при $I = \text{const}$ к завышению средней мощности потерь в контактной сети на 50%.

Действующее и среднеквадратичное значения тока в контактной сети. Физическое понятие действующего (эффективного) значения переменного тока связано с эквивалентным тепловым эффектом при

постоянном токе I , что отражает выражение для средней мощности

$$\frac{1}{T_{дв}} \int_0^{T_{дв}} i^2(t) R_k(t) dt = I^2 R_{экв}, \quad (3)$$

где I – действующее значение переменного тока $i(t)$.

Определим среднее значение мощности в соответствии с (3):

$$P_{ср} = \frac{1}{T_{дв}} \int_0^{T_{дв}} i^2(t) R_k(t) dt = \frac{1}{T_{дв}} \int_0^{T_{дв}} \left\{ \frac{U(t) - k_2 v(t)}{R_{\Sigma} + R_k[x(t)]} \right\}^2 R_k[x(t)] dt.$$

Заменив переменную интегрирования, представим результат в следующем виде:

$$P_{ср} = \frac{1}{l} \int_0^l \frac{[U(x) - k_2 v(x)]^2}{v^*(x)} \gamma(x) dx, \quad (4)$$

где $U(x)$ определяется зависимостями $U(t)$ и $x(t)$; функция $\gamma(x) = R_k(x) / [R_{\Sigma} + R_k(x)]^2 = r_0 x / (R_{\Sigma} + r_0 x)^2$.

Квадрат эффективного значения тока

$$I^2 = \frac{P_{ср}}{R_{экв}} = \frac{\frac{1}{l} \int_0^l \frac{[U(x) - k_2 v(x)]^2}{v^*(x)} \gamma(x) dx}{\frac{1}{l} \int_0^l \frac{R_k(x)}{v^*(x)} dx}. \quad (5)$$

Квадрат среднеквадратичного значения тока

$$I_{ск}^2 = \frac{1}{T_{дв}} \int_0^{T_{дв}} i^2(t) dt = \frac{1}{l} \int_0^l \frac{[U(x) - k_2 v(x)]^2}{v^*(x)} \frac{\gamma(x)}{R_k(x)} dx. \quad (6)$$

Таким образом, в общем случае $I \neq I_{ск}$.

Рассмотрим стационарный режим при $U(x) = U = \text{const}$. В соответствии с (4) среднее значение мощности

$$P_{ср} = \frac{(U - k_2 v)^2}{r_0 l} \left(\ln \frac{R_{\Sigma} + r_0 l}{R_{\Sigma}} - \frac{r_0 l}{R_{\Sigma} + r_0 l} \right).$$

Квадрат эффективного значения тока в соответствии с (5) при $R_{экв} = r_0 l / 2$ определяется выражением

$$I^2 = 2 \left(\frac{U - k_2 v}{r_0 l} \right)^2 \left(\ln \frac{R_{\Sigma} + r_0 l}{R_{\Sigma}} - \frac{r_0 l}{R_{\Sigma} + r_0 l} \right),$$

а квадрат среднеквадратичного значения тока в соответствии с (6) имеет вид

$$I_{ск}^2 = \frac{(U - k_2 v)^2}{R_{\Sigma} (R_{\Sigma} + r_0 l)}.$$

Их соотношение

$$\left(\frac{I}{I_{ск}} \right)^2 = \frac{2[(1+\beta)\ln(1+\beta) - \beta]}{\beta^2}, \quad (7)$$

где $\beta = r_0 l / R_{\Sigma}$ – относительное сопротивление участка секции.

Зависимость $(I / I_{ск})^2$ от β приведена на рис. 1,а. Следует обратить внимание, что выражение (7) содержит разность двух составляющих, близких по значению, поэтому расчеты следует проводить с высокой степенью точности (учет не менее четырех цифр после запятой).

На основании полученной зависимости можно сделать вывод, что для стационарного режима возможно использование среднеквадратичного значения тока в качестве эффективного. Для нестационарного режима с постоянным ускорением при $U(x) = U = \text{const}$ среднее значение мощности

$$P_{ср} = \frac{U^2}{r_0 l} \left[\frac{\sqrt{\beta} \arctg \sqrt{\beta} - \beta}{2(1+\beta)} \right] + \frac{2Uk_2 v_{ср}}{r_0 l} \times \left[\frac{\beta}{1+\beta} - \ln(1+\beta) \right] + \frac{(k_2 v_{ср})^2}{r_0 l} \left(\frac{6+4\beta}{1+\beta} - \frac{6}{\sqrt{\beta}} \arctg \sqrt{\beta} \right).$$

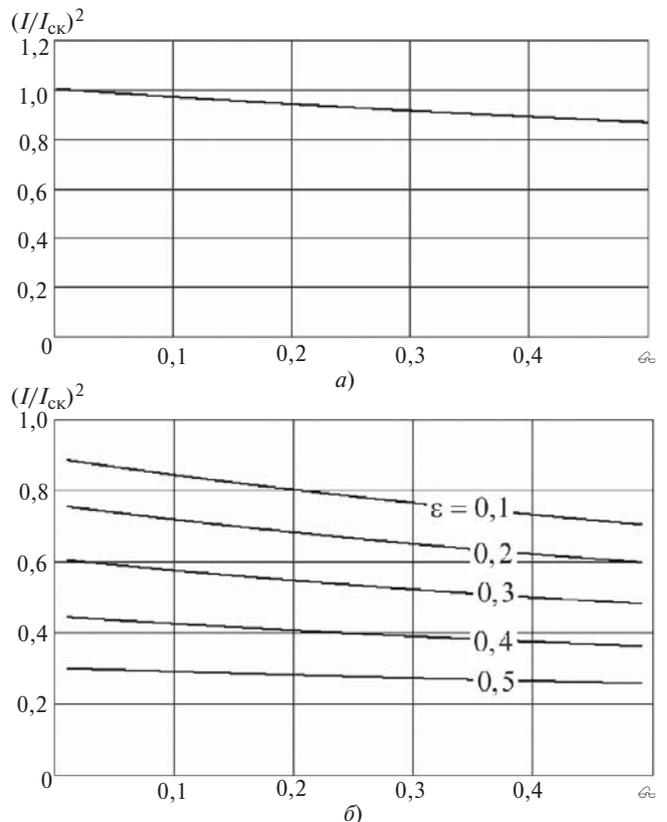


Рис. 1. Зависимость $(I / I_{ск})^2$ от относительного сопротивления участка секции контактной сети: а – для стационарного режима и б – при различных значениях электрического КПД привода для нестационарного режима с постоянным ускорением

Эквивалентное сопротивление для этого режима было определено выше и составляет $R_{\text{ЭКВ}} = r_0 l / 3$.

Квадрат эффективного значения тока в этом режиме

$$I^2 = \frac{U^2}{(r_0 l)^2} \left[\frac{3}{2} \sqrt{\beta} \operatorname{arctg} \sqrt{\beta} - \frac{\beta}{1+\beta} \right] + \frac{2Uk_2 v_{\text{CP}}}{(r_0 l)^2} \times \left[\frac{3\beta}{1+\beta} - 3 \ln(1+\beta) \right] + \frac{(k_2 v_{\text{CP}})^2}{(r_0 l)^2} \left(\frac{18+12\beta}{1+\beta} - \frac{18}{\sqrt{\beta}} \operatorname{arctg} \sqrt{\beta} \right).$$

а квадрат среднеквадратичного значения тока

$$I_{\text{СК}}^2 = \frac{U^2}{(r_0 l)^2} \left[\frac{1}{2} \left(\beta \sqrt{\beta} \operatorname{arctg} \sqrt{\beta} + \frac{\beta^2}{1+\beta} \right) \right] - \frac{2Uk_2 v_{\text{CP}}}{(r_0 l)^2} \times \left[\frac{\beta^2}{1+\beta} + \frac{(k_2 v_{\text{CP}})^2}{(r_0 l)^2} \left[2 \left(\sqrt{\beta} \operatorname{arctg} \sqrt{\beta} - \frac{\beta}{1+\beta} \right) \right] \right].$$

Введем параметр $\varepsilon = k_2 v_{\text{CP}} / U$, представляющий собой среднее значение электрического КПД тягового привода с учетом параметров контактной сети. В этом случае соотношение квадратов токов может быть представлено в виде:

$$\left(\frac{I}{I_{\text{СК}}} \right)^2 = \frac{\frac{3}{2} \left[\left(\sqrt{\beta} \operatorname{arctg} \sqrt{\beta} - \frac{\beta}{1+\beta} \right) \right] + 6\varepsilon \left[\frac{\beta}{1+\beta} - \ln(1+\beta) \right] + \varepsilon^2 \left[\frac{18+12\beta}{1+\beta} - \frac{18}{\sqrt{\beta}} \operatorname{arctg} \sqrt{\beta} \right]}{\frac{1}{2} \left(\beta \sqrt{\beta} \operatorname{arctg} \sqrt{\beta} + \frac{\beta^2}{1+\beta} \right) - 2\varepsilon \frac{\beta^2}{1+\beta} + 2\varepsilon^2 \left(\sqrt{\beta} \operatorname{arctg} \sqrt{\beta} - \frac{\beta}{1+\beta} \right)} \rightarrow$$

Из приведенных на рис. 1,б зависимостей $(I / I_{\text{СК}})^2$ в функции β при фиксированных ε видна явная недопустимость использования среднеквадратичного значения тока в качестве действующего. Если определять потери в контактной сети по среднеквадратичному току, используя статическое эквивалентное сопротивление $R_{\text{ЭКВ}} = r_0 l / 2$, то ошибочное значение потерь

$$P_{\text{ош}} = I_{\text{СК}}^2 r_0 l / 2.$$

Реальные же потери в нестационарном режиме

$$P = I^2 r_0 l / 3,$$

и ошибка в этом случае составляет:

$$\Delta\% = \frac{P - P_{\text{ош}}}{P} 100\% = \left[1 - \frac{1,5}{(I / I_{\text{СК}})^2} \right] 100\%.$$

Например, при $\varepsilon=0,2$ и $\beta=0,1$ соотношение токов $(I / I_{\text{СК}})^2 = 0,72$, т.е. значение потерь при неправильном расчете в 2 раза превышает действительные потери.

Полученные в работе результаты могут быть использованы для реальных графиков движения. На рис. 2 приведен один из возможных графиков движения для определения интегральных характеристик тока в контактной сети. Участок торможения на рис. 2 отсутствует, так как предполагается, что в режиме торможения двигатель отключен от контактной сети и работает на накопитель энергии, установленный на транспортной единице. Первый участок движения характеризуется параметрами:

$$q_1 = T_1 / T; \beta_1 = v_{\text{CP1}} T_1 r_0 / R_{\Sigma}; \varepsilon_1 = k_2 v_{\text{CP1}} / U,$$

а второй участок —

$$q_2 = T_2 / T; \beta_2 = v_2 T_2 r_0 / R_{\Sigma}.$$

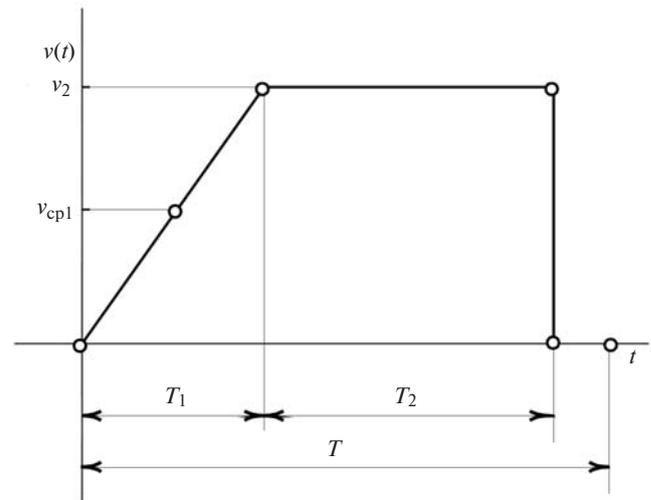


Рис. 2. График движения на интервале существования цепи «контактная сеть—тяговый привод»

Для первого участка справедливы зависимости рис. 1,б для второго — рис. 1,а.

Квадрат среднеквадратичного значения тока за цикл T

$$I_{\text{СК}}^2 = q_1 I_{1\text{СК}}^2 + q_2 I_{2\text{СК}}^2.$$

Квадрат действующего значения тока за цикл T

$$I^2 = \frac{R_{\text{ЭКВ1}}}{R_{\text{ЭКВ}}} I_1^2 + \frac{R_{\text{ЭКВ2}}}{R_{\text{ЭКВ}}} I_2^2,$$

где $R_{\text{ЭКВ1}} = r_0 l / 3$ и $R_{\text{ЭКВ2}} = r_0 l / 2$ — эквивалентные сопротивления для участков;

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{l_1}{l_1 + l_2} R_{\text{ЭКВ1}} + \frac{l_2}{l_1 + l_2} R_{\text{ЭКВ2}} - \text{эквивалентное}$$

сопротивление для цикла, определяемое в соответствии с (1).

Мгновенное и среднее значения момента тягового двигателя. В [1] показано, что электромагнитная мощность двигателя, преобразуемая в механическую, определяется как

$$P_{\text{Мех}} = u_{\text{ДВ}} i,$$

где $u_{\text{ДВ}}$ – напряжение преобразования энергии (напряжение движения).

При этом форма напряжения преобразования энергии [2] имеет вид

$$u_{\text{ДВ}} = v \frac{\partial \psi}{\partial x},$$

где ψ – потокосцепление якоря.

Для детального рассмотрения потокосцепление якоря целесообразно разложить на составляющие:

$$\psi = \psi_{\text{В}} + \psi_{\text{С}},$$

где $\psi_{\text{В}}$ – потокосцепление якоря, обусловленное потоком возбуждения; $\psi_{\text{С}} = L_{\text{Я}} i$ – собственное потокосцепление якоря, определяемое его индуктивностью ($L_{\text{Я}}$).

В этом случае

$$u_{\text{ДВ}} = v \frac{\partial \psi_{\text{В}}}{\partial x} + v L_{\text{Я}} \frac{\partial i}{\partial x} = e + L_{\text{Я}} \frac{\partial i}{\partial x} v,$$

где e – ЭДС движения ДПВ, рассмотренная в начале статьи.

Авторы в своих примерах ограничились функциональной зависимостью $i = i(t)$, что выполняется при условии питания двигателя от источника тока. В этом случае $di / dx = 0$ и механическая мощность

$$P_{\text{Мех}} = u_{\text{ДВ}} i = ei,$$

а доля электромагнитной мощности, определяемой электромагнитной энергией, запасаемой в поле якоря,

$$P_{\text{ЭМ}}^{\text{Я}} = L_{\text{Я}} i \frac{di}{dt}.$$

В тяговом приводе с контактной сетью условия питания насыщенного ДПВ принципиально другие. Здесь $i = i(t, v, x)$ и, следовательно, напряжение самоиндукции в якоре

$$u_L = L_{\text{Я}} \frac{di}{dt} = L_{\text{Я}} \frac{d}{dt} \left(\frac{u(t) - k_2 v(t)}{R_{\Sigma} + r_0 x(t)} \right) = u_L^t + u_L^{\text{ДВ}}$$

имеет как временной u_L^t , так и пространственный $u_L^{\text{ДВ}}$ компоненты.

Действительно,

$$\frac{di}{dt} = \frac{\partial i}{\partial t} + a \frac{\partial i}{\partial v} + v \frac{\partial i}{\partial x}.$$

При детальном рассмотрении процессов нецелесообразно объединение двух последних составляющих правой части на основании соотношения $a / v = \partial v / \partial x$ и поэтому пространственный компонент напряжения самоиндукции представим в виде

$$u_L^{\text{ДВ}} = -k_2 a T - r_0 v T i,$$

где $T = \frac{L_{\text{Я}}}{R_{\Sigma} + r_0 x}$.

Таким образом, выражение для напряжения преобразования энергии для ДПВ с насыщенной магнитной цепью имеет вид

$$u_{\text{ДВ}} = e + u_L^{\text{ДВ}} = k_2 v - k_2 a T - r_0 T i v.$$

Мгновенное значение механической мощности двигателя

$$P_{\text{Мех}} = ei + u_L^{\text{ДВ}} i = k_2 v i - k_2 a T i - r_0 T i^2 v$$

позволяет определить:

усилие на ободу колеса

$$F_{\text{К}} = \frac{P_{\text{Мех}}}{v} = k_2 i - \frac{k_2 a T i}{v} - r_0 T i^2;$$

мгновенное значение момента двигателя при движении ($v \neq 0$)

$$M_{\text{ДВ}}(t) = \frac{F_{\text{К}} r_{\text{К}}}{\mu} = c \Phi i - \frac{c \Phi a T i}{v} - \frac{r_0 r_{\text{К}} T i^2}{\mu}. \quad (8)$$

При установившемся режиме работы ($v = \text{const}$) и идеальной контактной сети ($r_0 = 0$) из (8) следует выражение статического момента $M_{\text{ДВ}} = c \Phi i$, которое неправомерно распространяется на динамические процессы и принципиально не применимо для тяговых приводов с контактной сетью и в установившихся режимах движения вследствие влияния контактной сети на величину тока. В общем случае электромагнитная мощность якоря двигателя

$$P_{\text{ЭМ}} = P_{\text{ЭМ}}^{\text{Я}} + P_{\text{Мех}} = L_{\text{Я}} i \frac{\partial i}{\partial t} + P_{\text{Мех}} = iT \frac{dU(t)}{dt} + P_{\text{Мех}},$$

где $p_{\text{ЭМ}}^{\text{я}}$ — доля электромагнитной мощности, определяемой электромагнитной энергией, запасаемой в поле якоря.

Среднее значение момента двигателя при движении с насыщенной магнитной цепью определяется выражением

$$M_{\text{ср}}^{\text{дв}} = \frac{1}{T_{\text{дв}}} \int_0^{T_{\text{дв}}} M_{\text{дв}}(t) dt = \\ = c\Phi I_{\text{ср}} - c\Phi \frac{1}{T_{\text{дв}}} \int_0^{T_{\text{дв}}} iT \frac{a}{v} dt - \frac{r_0 r_{\text{к}}}{\mu} \frac{1}{T_{\text{дв}}} \int_0^{T_{\text{дв}}} i^2 T dt,$$

где $I_{\text{ср}}$ — среднее значение тока.

Аналогично определяются мгновенное и среднее значения момента в случае ненасыщенного ДВП при токе

$$i = \frac{U(t)}{R_{\Sigma} + r_0 x + k_1 v}.$$

Мгновенное значение механической мощности

$$p_{\text{мех}} = k_1 i^2 v - k_1 a T_1 i^2 - r_0 T_1 i^2 v,$$

а мгновенное значение момента при движении ($v \neq 0$) определяется по выражению

$$M_{\text{дв}}(t) = c\alpha i^2 - \frac{c\alpha a T_1 i^2}{v} - \frac{r_0 r_{\text{к}}}{\mu} T_1 i^2, \quad (10)$$

где $T_1 = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\Sigma} + r_0 x + k_1 v}$.

Среднее значение момента ненасыщенного ДПВ

$$M_{\text{ср}}^{\text{дв}} = c\alpha I_{\text{ск}}^2 - c\alpha \frac{1}{T_{\text{дв}}} \int_0^{T_{\text{дв}}} i^2 T_1 \frac{a}{v} dt - \frac{r_0 r_{\text{к}}}{\mu} \frac{1}{T_{\text{дв}}} \int_0^{T_{\text{дв}}} i T_1 dt, \quad (11)$$

где $I_{\text{ск}}$ — среднеквадратичное значение тока.

Следует обратить внимание, что статический средний момент насыщенного ДПВ пропорционален среднему значению тока, а аналогичный момент ненасыщенного ДПВ пропорционален сред-

неквадратичному значению тока. Это положение следует учитывать при синтезе импульсных регуляторов тока тягового привода. В ненасыщенной зоне момент не зависит от коэффициента формы тока, и частота импульсного регулятора может быть существенно снижена. В насыщенной зоне следует повысить частоту коммутации.

Выводы. 1. При соблюдении критерия неизменности средней мощности потерь переменное сопротивление участка секции контактной сети эквивалентуется средним по времени значением сопротивления, существенно зависящим от интенсивности движения в динамическом процессе.

2. Для стационарного движения с постоянной скоростью возможно использовать среднеквадратичное значение тока в качестве действующего (эффективного).

3. При расчете потерь для нестационарного движения использование понятия среднеквадратичного значения тока недопустимо.

4. Расчет моментов тягового двигателя постоянного тока необходимо выполнять с учетом собственного электромагнитного поля якоря, что позволяет учитывать динамическую реакцию якоря и влияние параметров контактной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уайт Д., Вудсон Г. Электрическое преобразование энергии. — М.; Л.: Энергия, 1964.
2. Малинин Л.И., Нейман В.Ю. Определение напряжения преобразования энергии и электромагнитных сил в электромеханических системах. — Электричество, 2008, №6.

[20.03.11]

Авторы: Малинин Леонид Иванович в 1967 г. окончил электромеханический факультет Новосибирского электротехнического института (НЭТИ). Докторскую диссертацию «Энергетика сервоприводов постоянного тока» защитил в 1993 г. в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ). Профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» НГТУ.

Нейман Владимир Юрьевич в 1986 г. окончил электротехнический факультет НЭТИ. Докторскую

* * *

Авторы статей «Формализованная расстановка устройств управления режимами в сетях мегаполисов» — Фролов О.В., Чемборисова Н.Ш., Мулиц Н.С. (Электричество, 2012, № 5, с. 5–9) и «Предварительный анализ параметров сети для расстановки устройств ограничения токов короткого замыкания в сетях мегаполисов» — Фролов О.В., Чемборисова Н.Ш. (Электричество, 2012, № 8, с. 26–29) сообщают, что исследования, результаты которых отражены в указанных статьях, проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

диссертацию «Основы построения и развитие теории импульсных линейных электромагнитных двигателей с повышенными энергетическими показателями» защитил в 2004 г. в НГТУ. Профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» НГТУ.