

УДК: 621.838.222

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

И.В. Бочкарев

Получены аналитические выражения для оценки эксплуатационных свойств электромагнитных фрикционных муфт в режимах размыкания, замыкания и реверса

Ключевые слова: электромагнитная муфта; фрикционный узел; управляющий электромагнит; постоянный магнит; момент трения; ведущий и ведомый вал

CALCULATION OF THE PARAMETERS OF THE ELECTROMAGNETIC FRICTION CLUTCH IN TRANSIENT CONDITIONS

I.V. Bochkaev

The article deals with analytical expressions for the evaluation of the performance properties of electromagnetic friction clutches in opening, closing and reverse modes.

Key words: an electromagnetic clutch; a friction node; an operating solenoid; a permanent magnet; friction torque; driving and driven shaft.

В современной технике в различных системах автоматического управления широко используются электромагнитные фрикционные муфты (ЭФМ), которые являются устройствами для дистанционного управления процессами передачи крутящего момента. С помощью ЭФМ осуществляется плавное сцепление и расцепление валов, защита от толчков и ударов, компенсация температурных деформаций валов, реверсирование электродвигателей и т. д.

Очевидно, что технический уровень и эксплуатационные показатели систем автоматического управления в значительной степени зависят от параметров и характеристик входящих в них ЭФМ. Одним из путей улучшения эксплуатационных показателей ЭФМ является использование в их конструкции магнитоэлектрического привода, содержащего управляющий электромагнит (УЭ) и постоянный магнит (ПМ) [1]. Выходные параметры ЭФМ зависят от величины и характера изменения суммарного тягового усилия $F_T(\delta, i)$, действующего на якорь УЭ. Это усилие в ЭФМ данного типа имеет три составляющие, величины которых зависят от воздушного зазора δ между якорем и магнитопроводом и от величины тока i в УЭ:

$$F_T(\delta, i) = |F_M(\delta) - F_{эм}(i)| - F_{пр}(\delta) \geq 0, \quad (1)$$

где $F_M(\delta)$ – тяговое усилие, действующее на якорь со стороны магнитного поля постоянного магнита; $F_{эм}(i)$ – тяговое усилие, создаваемое управляющим электромагнитом; $F_{пр}(\delta)$ – усилие возвратной пружины.

Момент трения во фрикционном узле равен

$$M_{тр} = k_{тр} \cdot R_{ср} \cdot F_T(\delta, i), \quad (2)$$

где $k_{тр}$ – коэффициент трения; $R_{ср}$ – средний радиус действия силы трения.

Величина суммарного тягового усилия, действующего на якорь при обесточенной обмотке УЭ, зависит от взаимного вида характеристик тягового усилия $F_M(\delta)$ (кривая 1 на рисунке 1), и усилия возвратной пружины $-F_{пр}(\delta)$ (кривые 2 на рисунке 1). Знак минус перед усилием $F_{пр}$ показывает, что в ЭФМ оно направлено встречно усилию F_M . Если характеристика пружины соответствует кривой 2 а, то якорь будет притянут к магнитопроводу усилием $F_{T,0}$ и воздушный зазор будет равен эквивалентному остаточному зазору $\delta = \delta_0$ (нормальная работа, муфта замкнута). Если характеристика пружины будет соответствовать кривой 2 б, то якорь за счет усилия $F_{T,р}$ будет иметь положение, при котором воздушный зазор будет равен максимальному

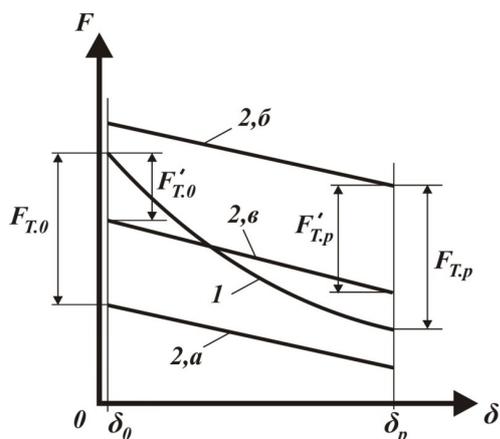


Рисунок 1 – Зависимость суммарного тягового усилия при отключенной обмотке УЭ

рабочему $\delta = \delta_p$, т. е. муфта будет постоянно разомкнута. И, наконец, если характеристика пружины соответствует кривой 2 в, то якорь при отсутствии тока в обмотке за счет сил $F'_{T,0}$ и $F'_{T,p}$ может занимать два положения, то есть оставаться после отключения питания в том положении, в котором он находился перед снятием напряжения. Следовательно, для правильной работы ЭФМ необходимо выполнить два условия: $F_{np}(\delta_0) < F_m(\delta_0)$ и $F_{np}(\delta_p) < F_m(\delta_p)$.

Рассмотрим процессы, протекающие в переходных режимах работы ЭФМ. Процессы во фрикционном узле (ФУ) определяются соотношением величин момента трения M_{mp} в фрикционном узле, приведенного момента сил сопротивления M_c механизма и вращающего момента $M_{вр}$ двигателя [2].

Процесс размыкания фрикционного узла.

В обесточенном состоянии ФУ ЭФМ замкнут тяговым усилием, создаваемым магнитным полем ПМ. При подаче напряжения УЭ создает встречное поле и тяговое усилие, и момент трения между полумуфтами уменьшаются до нуля. Для инженерных расчетов можно принять, что усилие прижатия полумуфт $F_{вкл}$ при этом спадает пропорционально времени t . Тогда, принимая коэффициент трения на трущихся поверхностях постоянным, момент трения M_{mp} в муфте будет изменяться по закону, соответствующему закону изменения силы $F_{вкл}$:

$$M_{mp} = M_{max} - k \cdot t, \tag{3}$$

где $k = M_{max} / t_{выкл}$.

Максимальный момент M_{max} равен

$$M_{max} = k_{mp} \cdot R_{cp} \cdot F_{T,0}, \tag{4}$$

где $F_{T,0} = F_m(\delta_0) - F_{np}(\delta_0)$ – тяговое усилие при отсутствии тока в обмотке; δ_0 – остаточный эквивалентный воздушный зазор между якорем и магнитопроводом, величина которого зависит от чистоты

обработки сопрягаемых поверхностей и качества сборки фрикционного узла.

Время полного выключения муфты $t_{выкл}$, которое определяется по кривой нарастания тока в обмотке (методика расчета тока приведена в [1]), наступает в тот момент, когда выполняется условие

$$F_T(\delta, i) = F_m(\delta_0) - F_{эм}(i, \delta_0) - F_{np}(\delta_0) = 0. \tag{5}$$

Зависимость $M_{тр} = f(t)$ в соответствии с (3) имеет вид прямой (рисунок 2), где t_1 – время снижения момента M_{mp} до значения M_c ; t_2 – время, за которое момент M_{mp} на ведомом валу исчезнет полностью; $t_{выкл}$ – время полного выключения муфты; $t_{ост}$ – время полной остановки выходного вала.

В режиме размыкания муфты можно выделить два этапа: на первом этапе ведущий и ведомый валы вращаются с одинаковой скоростью ω_0 . т. к. $M_{mp} > M_c$; на втором этапе ведомый вал начинает отставать от ведущего, т. к. $M_{mp} < M_c$. После полного исчезновения момента M_{mp} на ведомом валу имеет место режим выключенного состояния муфты.

На втором этапе происходит взаимное проскальзывание фрикционных элементов муфты, причем остановка ведомого вала возможна как при $t_{выкл} < t_p$ так и при $t_{выкл} > t_p$ (см. рисунок 2).

Величины t_1 и t_2 могут быть рассчитаны по формулам

$$t_1 = (M_{max} - M_c) t_{выкл} / M_{max}; t_2 = t_{выкл} - t_1 = M_c t_{выкл} / M_{max}. \tag{6}$$

В процессе выключения ведущей полумуфтой совершается работа

$$A_{ВЫКЛ} = \int_0^{t_{выкл}} M \omega_1 dt. \tag{7}$$

Очевидно, что работа $A_{ВЫКЛ}$ состоит из полезной работы $A_{П}$ по преодолению M_c и работы сил трения $A_{ТР}$ при проскальзывании полумуфт. Кроме того, на преодоление M_c тратится накопленная кинетическая энергия A_J вращающихся частей:

$$A_{П} = \int_0^{t_{выкл}} M \omega_2 dt; A_{ТР} = \int_0^{t_2} M(\omega_1 - \omega_2) dt; A_J = \frac{J \omega_1^2}{2}. \tag{8}$$

Учтем, что на втором этапе уравнение движения имеет вид

$$J d\omega_2 = (M_c - M) dt, \tag{9}$$

где J – суммарный момент инерции ведомых частей, приведенных к муфте.

Тогда при принятых допущениях работу трения, совершенную моментом трения M_{mp} , можно вычислить, интегрируя уравнения (8) и (9):

- при $t_{ост} < t_{выкл}$ работа торможения равна

$$A_{mp} = \omega_0 M_c \sqrt{\frac{J \omega_0 (4 - k)}{18k}}; \tag{10}$$

- если $t_{ост} = t_{выкл}$, то

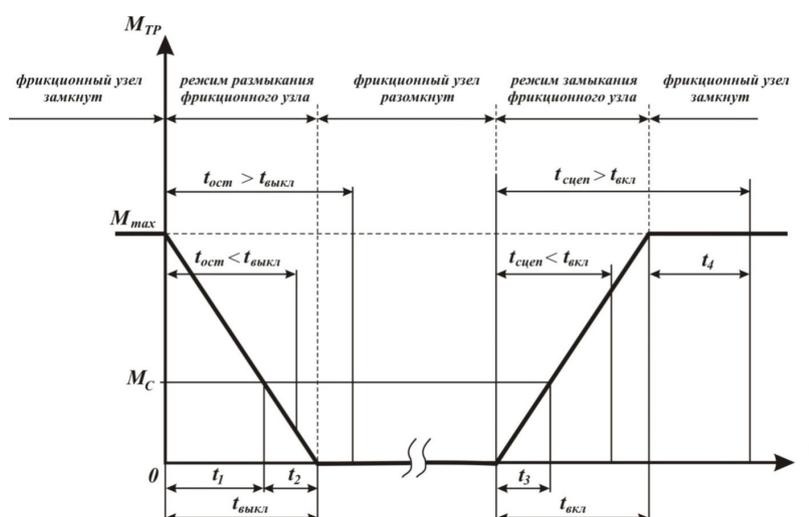


Рисунок 2 – Изменение момента трения в режимах размыкания и замыкания фрикционного узла муфты

$$A_{TP} = M_c^4 t_{\text{выкл}}^2 / (24JM_{\text{max}}^2). \quad (11)$$

На первом этапе размыкания фрикционного узла и при $t > t_{\text{выкл}}$, когда $M_{\text{тр}} = 0$, работа сил трения и нагрев фрикционной пары отсутствуют.

Время остановки выходного вала $t_{\text{ост}}$ вычисляется по выражению

$$t_{\text{ост}} = t_1 + \sqrt{2J\omega_0/k} = \left[(M_{\text{max}} - M_c) t_{\text{выкл}} / M_{\text{max}} + \sqrt{2J\omega_0 t_{\text{выкл}} / M_{\text{max}}} \right]. \quad (12)$$

Если при расчете по формуле (12) получим, что $t_{\text{ост}} \leq t_{\text{выкл}}$, то это значение $t_{\text{ост}}$ является действительным. Если получим, что $t_{\text{ост}} > t_{\text{выкл}}$, то его надо вычислять по формуле

$$t_{\text{ост}} = \frac{J\omega_0}{M_c} + t_{\text{выкл}} (1 - M_c / (2M_{\text{max}})). \quad (13)$$

Процесс замыкания фрикционного узла обеспечивается тяговым усилием, развиваемым магнитным потоком ПМ и начинается с момента снятия напряжения с УЭ. Замыкание ФУ является виброударным процессом, т.к. при взаимодействии полумуфт будут наблюдаться отскоки ведущей полумуфты. При этом, если время замыкания полумуфт больше, чем период собственных колебаний всего электропривода, то переходными механическими процессами, обусловленными замыканием ФУ, можно пренебречь.

Как и при описании процесса размыкания муфты, примем в этом режиме работы зависимость между моментом $M_{\text{тр}}$ и временем линейной. Тогда момент трения $M_{\text{тр}}$ в муфте будет возрастать по следующему закону:

$$M_{\text{тр}} = k_1 \cdot t, \quad (14)$$

где $k_1 = M_{\text{max}} / t_{\text{вкл}}$ – коэффициент пропорциональности.

Временем полного включения муфты $t_{\text{вкл}}$ считается время, при котором момент трения $M_{\text{тр}}$ достигает своего максимального значения M_{max} (рисунок 2). Величина $t_{\text{вкл}}$ также определяется по кривой изменения тока в обмотке ЭУ [1]. Процесс замыкания фрикционного узла можно разбить на два этапа.

На первом этапе, который начинается с момента соприкосновения полумуфт, момент трения $M_{\text{тр}}$ нарастает до величины момента сил сопротивления M_c , приложенного к ведомому валу, причем

$$t_3 = M_c / k_1 = (M_c / M_{\text{max}}) t_{\text{вкл}}. \quad (15)$$

Очевидно, что на этом этапе ведомая полумуфта не вращается и практически вся энергия трения идет на нагрев фрикционного узла:

$$A_{TP} = \frac{1}{2} M_c \omega_1 t_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_c^2}{M_{\text{max}}} \omega_1 t_{\text{вкл}}. \quad (16)$$

На втором этапе замыкания при $t > t_3$ момент сил трения $M_{\text{тр}}$ станет больше момента M_c и ведомая полумуфта начнет вращаться с некоторым ускорением до тех пор, пока скорости обеих полумуфт не сравняются. Это произойдет в момент времени $t_{\text{сцеп}}$. Длительность этого этапа зависит от соотношения величин времени $t_{\text{сцеп}}$ и $t_{\text{вкл}}$ (см. рисунок 2). Проскальзывание полумуфт на этом этапе также сопровождается нагревом фрикционного узла. По окончании второго этапа муфта полностью замкнута и при $t \geq t_{\text{вкл}}$ момент трения равен $M_{\text{тр}} = M_{\text{max}} = \text{const}$. Очевидно, что на втором этапе полная работа, которую совершает ведомая полумуфта, состоит из трех частей – полезной работы $A_{\text{п}}$ по преодолению M_c , работы $A_{\text{р}}$, которая расходуется на разгон ведомой муфты и приводного механизма, и работы сил трения $A_{\text{тр}}$ при проскальзывании

полумуфт. Величины A_{II} и A_J могут быть вычислены по уравнениям

$$A_{II} = \int_{t_1}^{t_{сцеп}} M_c \omega_2 dt; A_J = \frac{J\omega_1^2}{2}. \quad (17)$$

Величина A_{TP} является функцией передаваемого муфтой момента и относительной скорости ее полумуфт:

$$A_{TP} = \int_0^{t_{сцеп}} M(\omega_0 - \omega) dt = \int_0^{t_{сцеп}} \left(M_c + J \frac{d\omega}{dt} \right) (\omega_0 - \omega) dt = \\ = \frac{J\omega_0^2}{2} + \int_0^{t_{сцеп}} M_c (\omega_0 - \omega) dt. \quad (18)$$

Время полного сцепления муфты $t_{сцеп}$ можно определить из уравнения нарастания скорости выходного вала:

$$\omega(t) = \frac{1}{J} \int_0^t (M - M_c) dt. \quad (19)$$

Учитывая, что $M = M_c + k_1 \cdot t$, из уравнения (19) получим $\omega_{сцеп} = k_1 t_{сцеп}^2 / 2J$. Тогда, интегрируя уравнение (18) с учетом полученного решения уравнения (19), получаем следующие формулы для расчета времени сцепления $t_{сцеп}$ и работы трения A_{mp} , совершенной моментом трения M_{mp} за это время $t_{сцеп}$:

- если время $t_{сцеп} \leq t_{вкл}$, то

$$\left. \begin{aligned} t_{сцеп} &= t_3 + \sqrt{2J\omega_0 t_{вкл} / M_{max}}, \\ A_{TP} &= J\omega_0^2 / 2 + \frac{2}{3} M_c \omega_0 \sqrt{(2J\omega_0) / k_1} + M_c^2 \omega_0 / (2k_1); \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

- если время $t_{сцеп} > t_{вкл}$, то

$$\left. \begin{aligned} t_{сцеп} &= (t_{вкл} + t_3) / 2 + J\omega_0 / (M_{max} - M_c), \\ A_{TP} &= \omega_0 \left[k_1 t_{вкл}^2 / 2 + M_{max} t_4 \right] - \frac{M_c}{2J} [k_1 (t_{вкл} - t_3)^3 + \\ &+ (M_{max} - M_c) t_4^2 + k_1 (t_{вкл} - t_3)^2 t_4] - J\omega_0^2 / 2, \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где ω_0 – угловая скорость ведущего вала;

$$t_3 = M_c / k_1 = t_{вкл} \frac{M_c}{M_{max}}; t_4 = \frac{2J\omega_0 - k_1(t_{вкл} - t_3)^2}{2(M_{max} - M_c)}. \quad (22)$$

Очевидно, что для улучшения эксплуатационных свойств ЭФМ необходимо уменьшать величины A_{mp} и времени $t_{сц}$. Наиболее просто это достигается при включении муфты при уменьшенной нагрузке M_c и скорости ω_0 . Этого можно добиться и путем уменьшения времени $t_{вкл}$, но при этом снизится плавность включения муфты, что приведет к ударной нагрузке на валы. Анализ показал, что условия включения муфты будут оптимальными при

$$t_{вкл} \geq 2J\omega_0 \frac{M_{max}}{(M_{max} - M_c)^2}. \quad (23)$$

В этом случае полное сцепление полумуфт будет обеспечиваться при условии, что в конце сцепления $M_{тр} < M_{max}$ и нагрузка на валы не будет превышать допустимых значений. Добиться этого

можно путем соответствующего выбора параметров ОЭ и ПМ.

Процессы, протекающие во фрикционном узле муфты, работающей в режиме тормоза (т. е. когда ведомая полумуфта замкнута на корпус), описываются уравнениями, аналогичными приведенным выше. Например, при замыкании тормоза скорость выходного вала и потери в фрикционном узле изменяются в соответствии с выражениями, аналогичными (19) и (20):

$$\omega(t) = \omega_0 - \frac{1}{J} \int_0^{t_r} (M - M_c) dt; \\ A_{TP} = \frac{J\omega_0^2}{2} - \int_0^{t_r} M_c \omega_0 dt. \quad (24)$$

Процесс реверса фрикционной муфты можно разбить на два периода – период торможения ведущей полумуфты и период разгона ее до исходной скорости в другую сторону. Очевидно, что на первом периоде реверса ведомая полумуфта вращается в обратном направлении относительно ведомой, поэтому величина работы сил трения A_{TP} , которая является функцией относительной скорости полумуфт, может быть рассчитана по уравнению

$$A_{TP} = \int_0^{t_{моу}} M(2\omega_n - \omega) dt = \int_0^{t_{сцеп}} \left(J \frac{d\omega}{dt} - M_n \right) (2\omega_0 - \omega) dt. \quad (25)$$

После интегрирования данного уравнения получаем:

$$A_{TP} = 3J\omega_n^2 / 2 - \int_0^{t_r} M_n \omega_n dt. \quad (26)$$

Сравнивая уравнения (24) и (26) видно, что при осуществлении реверса первый член, т. е. постоянная составляющая работы сил трения A_{TP} , в три раза больше, чем при непосредственном торможении. Второй период реверса протекает аналогично процессу замыкания фрикционного узла, рассмотренному выше, и, соответственно, описывается теми же уравнениями.

Расчет сил трения выполняется для оценки теплового состояния фрикционного узла, среднее превышение температуры которого можно определить по величине A_{TP} по следующей формуле

$$t_{cp}^0 = (2,78 \cdot 10^{-4} \frac{A_{TP} \cdot N}{\alpha \cdot S}) \times \\ \times [1 - \exp(3,6 \cdot 10^3 \cdot \frac{t_{вкл} \cdot \alpha \cdot S_{охл}}{m \cdot C})], \quad (27)$$

где N – число включений в 1 час; α – коэффициент теплоотдачи; $S_{охл}$ и m – площадь охлаждаемой поверхности и масса ЭФМ; C – теплоемкость.

Для проверки полученных выражений были проведены испытания ЭФМ, работающей в режиме тормоза. Результаты приведены в таблице 1. Испытания проводились при $FI=1,0$ (FI – коэф-

фициент нагрузки, равный отношению приведенного момента инерции затормаживаемых масс к моменту инерции ротора электродвигателя и якоря ЭФМ).

Таблица 1 – Данные по нагреву фрикционного узла

Тип электродвигателя	Температура после единичного торможения, 0С	
	расчет	эксперимент
ВЭМ-1	62,8	58,1
ВЭМ-2	68,8	62,1
4A80A4	60,3	54,5

Сравнение результатов расчета и эксперимента показывает их хорошую сходимость, что подтверждает корректность полученных выражений.

Литература

1. *Бочкарев И.В., Галбаев Ж.Т.* Электромагнитные механизмы с постоянными магнитами и схемы их управления для систем автоматизации / И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев. Бишкек: Илим, 2008. 274 с.
2. *Бочкарев И.В., Галбаев Ж.Т.* Разработка фрикционных муфт и тормозов с магнитоэлектрическим приводом / И.В. Бочкарев, Ж.Т. Галбаев // *Электротехника*. 2009. №7. С. 14–20.