

И. В. Бочкарев, Д. Н. Садыков, eltech@mail.ru

Институт машиноведения и автоматизации НАН КР

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ТОРМОЗНОМ УСТРОЙСТВЕ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ЯКОРЯ

Проведены исследования переходных процессов, протекающих в электромеханических тормозных устройствах в зависимости от схемы их управления. Рассмотрены законы изменения тока и потокосцепления электромагнита в различных режимах работы. Составлена и проанализирована математическая модель тормозного устройства в виде системы дифференциальных уравнений с учетом особенностей его конструкции и рабочих режимов. На базе математической модели построены имитационные модели тормозного устройства в среде Simulink при различных схемах управления, в том числе с форсировкой размыкания фрикционного узла тормоза. С использованием имитационных моделей проведены исследования переходных процессов в тормозном устройстве в зависимости от изменения его параметров, и даны рекомендации по выбору наиболее целесообразных схем форсировки.

Ключевые слова: тормозное устройство, схема форсировки, переходный процесс, моделирование, математическая модель.

Введение. При проектировании и исследовании различных электроприводов, содержащих электромеханические тормозные устройства с соответствующей системой управления, возникает необходимость в исследовании влияния динамических свойств непосредственно самого тормозного устройства на переходные процессы системы в целом. Основными параметрами тормозных устройств являются величина тормозного момента и параметры быстродействия размыкания и замыкания их фрикционного узла. Данные параметры напрямую влияют не только на динамические параметры электропривода, но и на электрические потери в приводном двигателе и на механические потери в самом тормозном устройстве. Это в свою очередь сказывается на остаточном ресурсе двигателя и тормоза.

Важной частью исследований по данному вопросу является имитационное моделирование систем электропривода и, в частности, тормозных устройств. При этом следует отметить, что, не смотря на простоту конструкции электромеханических тормозных устройств, динамические процессы которых схожи с прямоходовым электромагнитом с поступательным движением якоря, математическое описание представляет собой значительную сложность. Поэтому для приведения математической модели к виду, удобному для моделирования и расчетов принимают ряд допущений.

Постановка задачи. Для проведения исследования переходных процессов в электромеханическом тормозном устройстве требуется составить и проанализировать математическую модель тормоза с учетом особенностей его конструкции и рабочих режимов. Это позволит корректно синтезировать имитационную модель, с использованием которой можно будет достоверно исследовать переходные режимы работы ЭМТУ с учетом схемы их управления.

Результаты исследований. В качестве предмета исследования выберем дисковое пружинное нормально замкнутое электромеханическое тормозное устройство (ЭМТУ), широко используемое в тормозных модификациях электродвигателей [1], составляю-

щих основу позиционных электроприводов. Принципиальная конструктивная компоновка такого ЭМТУ показана на рис. 1.

ЭМТУ устанавливается со стороны вентиляционного узла электродвигателя и закрепляется на подшипниковом щите двигателя (на рис. 1 не показан). Он состоит из электромагнита, содержащего магнитопровод 1 и обмотку 2, якоря 3, тормозного диска 4 и тормозного фланца 5. Якоря 3 может передвигаться в осевом направлении по направляющим штифтам 6, неподвижно закрепленных в магнитопроводе. Тормозной диск 4 выполнен в виде упругой мембраны, на которой наклеены тормозные накладки 7, и закреплен на буртике 8 переходной втулки 9, зафиксированной на валу 10 электродвигателя.

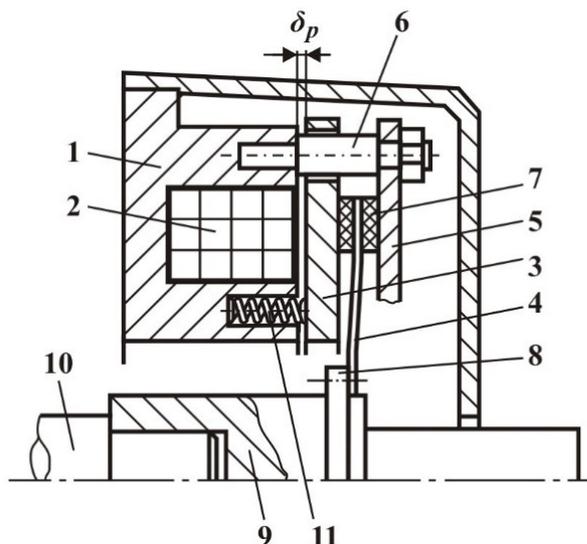


Рисунок 1 – Разрез ЭМТУ по оси вала электрической машины

При обесточенной обмотке 2 тормозной диск 4 зажат между якорем 3 и тормозным фланцем 5 усилием тормозных пружин 11, размещенных в пазах, выполненных в магнитопроводе. За счет этого вал 10 заторможен силами трения. При подаче напряжения на обмотку 2 якорь 3 под воздействием магнитного поля электромагнита притягивается к магнитопроводу 1 и освобождает тем самым тормозной диск 4. Упругая мембрана распрямляется и тормозные колодки 7 перестают контактировать и с якорем, и с тормозным фланцем 5, и на вал перестает действовать тормозной момент.

Так как динамические процессы в ЭМТУ схожи с процессами в электромагнитах, то дифференциальные уравнения, описывающие процессы нарастания тока и движения якоря, будут аналогичны друг другу [2,3].

Дифференциальное уравнение электрического равновесия и описание состояния магнитной цепи электромагнита ЭМТУ будут иметь вид [2,3,4]:

$$u(t) = i(t)R + \frac{d\psi}{dt}; \quad (1)$$

$$\psi = (i, x), \quad (2)$$

где $u(t)$ – напряжение источника питания; i – ток протекающий по катушке электромагнита; R – активное сопротивление катушки электромагнита; ψ – потокосцепление катушки; x – величина перемещения якоря электромагнита.

Изменение тока $i(t)$ имеет сложный характер. Весь рабочий цикл его изменения показан на рис.2.

Весь рабочий цикл можно разбить на четыре режима [1, 5]:

I – режим при отключенном источнике питания, при котором ток в обмотке электромагнита отсутствует и фрикционный узел разомкнут, причем между ним и магнитопроводом имеется зазор $\delta = \delta_p$;

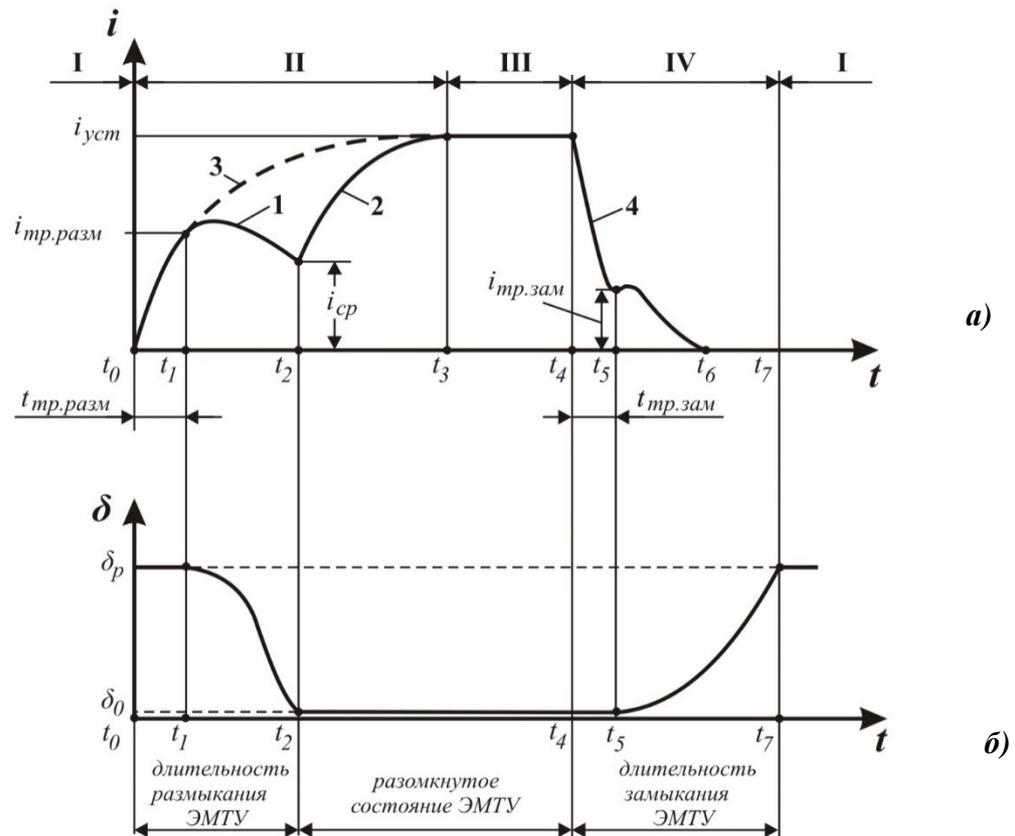


Рисунок 2 – Рабочий цикл электромагнитного привода ЭММ ПМ:

a – зависимость тока в обмотке при питании от источника постоянного напряжения; *б* – кривая изменения зазора между якорем и магнитопроводом

II – режим подключения обмотки к источнику питания (режим размыкания ЭМТУ), который включает в себя три периода:

- время нарастания тока до величины тока трогания $i_{тр. разм}$, в течение которого сила притяжения якоря к магнитопроводу постепенно увеличивается и в момент времени t_1 становится равной усилию тормозных пружин, что приводит к исчезновению сил трения в фрикционном узле и его размыканию;

- время движения якоря. В этом периоде работы индуктивность L магнитной системы будет изменяться и уравнение (1) будет иметь следующий вид

$$u(t) = i(t)R + \frac{d\psi}{dt} = i(t)R + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}. \quad (3)$$

Таким образом, появляется противодействующая ЭДС $i \cdot dL/dt$, за счет которой ток в обмотке электромагнита уменьшается и в кривой тока появляется характерный провал (линия 1). В момент времени t_2 якорь полностью притягивается к магнитопроводу и упирается в него. В этом состоянии между ними останется остаточный эквивалентный воздушный зазор δ_0 , величина которого определяется чистотой обработанных сопрягаемых поверхностей и качеством сборки фрикционного узла. Ток при $t = t_2$ называют током срабатывания $i_{ср}$.

- время нарастания тока до установившейся величины (кривая 2).

Отметим, что если бы якорь не двигался, то нарастание тока в период $t = t_1 \div t_3$ происходило бы не по кривым 1 и 2, а плавно по пунктирной линии 3;

III – режим разомкнутого состояния фрикционного узла ($t = t_3 \div t_4$), при котором ток равен установившемуся значению $i_{уст}$;

IV – режим отключения обмотки от источника питания (режим замыкания ЭМТУ) Этот режим включает в себя три периода:

- время уменьшения тока до величины тока трогания $i_{тр.зам}$, в течение которого сила притяжения якоря к магнитопроводу постепенно снижается и в момент времени $t = t_5$ становится равной усилию тормозных пружин;

- время движения якоря от магнитопровода к тормозному диску, в течение которого опять наводится ЭДС самоиндукции и ток за счет этого может увеличиться относительно $i_{тр.зам}$. В момент времени t_7 якорь полностью прижимает тормозной диск 4 к тормозному фланцу 5 (рис. 1);

- время затухания тока до нуля, причем период $t_5 \div t_6$ может быть как меньше, так и больше периода $t_5 \div t_7$.

Изменение потокосцепления ψ также имеет сложный характер, поскольку в соответствии с (2) ψ зависит и от тока i обмотки, и от координаты перемещения якоря (рис. 3).

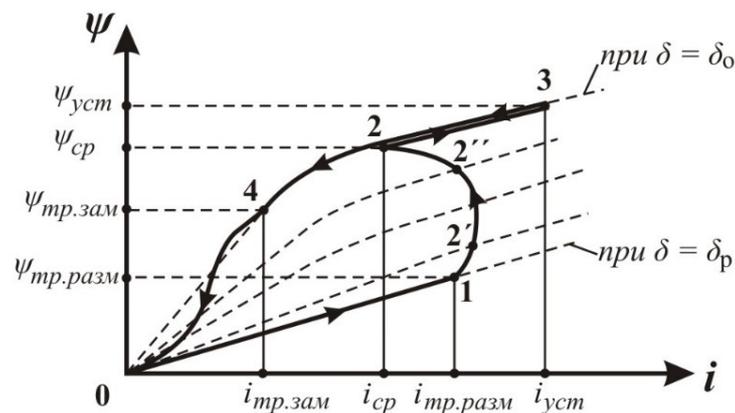


Рисунок 3 – Зависимость потокосцепления $\psi(i, x)$ от изменения тока в катушке и положения якоря относительно магнитопровода

Точка 0 соответствует состоянию, при котором питание отключено, ЭМТУ замкнут и зазор δ между якорем и магнитопроводом равен номинальному значению $\delta = \delta_p$. При подаче напряжения на обмотку ток начинает возрастать (рис. 2). Пропорционально току начинает увеличиваться потокосцепление ψ по прямой линии до точки 1, в которой ток становится равным току трогания $i_{тр.разм}$, при котором якорь начнет движение. За счет этого зазор в магнитной цепи начинает уменьшаться и крутизна линий $\psi = f(i)$ будет увеличиваться (на рис. 3 они показаны пунктирными кривыми между линиями при $\delta = \delta_p$ и $\delta = \delta_0$). Поскольку при движении якоря ток будет снижаться (см. рис. 2, кривая 1), то величина потокосцепления ψ будет изменяться нелинейно по точкам 2, 2' и т.д., которым соответствует значение перемещения якоря $x(t) \in (\delta_0; \delta_p)$, вплоть до момента полного размыкания фрикционного узла ($i = i_{сп}$, точка 2) и до установившегося режима ($i = i_{уст}$, точка 3).

После отключения питания ток начинает снижаться до тока трогания $i_{тр.зам}$ (точка 4), при котором якорь начнет движение и опять замкнет фрикционный узел. В этом режиме работы ЭМТУ величина потокосцепления ψ между точками 4 и 0 опять будет изменяться нелинейно.

При составлении математической модели ЭМТУ принимаем следующие допущения: 1) при передвижении якоря не учитывается сила трения по направляющим штифтам; 2) изменение индуктивности электромагнита при перемещении якоря $L(x)$ происходит по линейному закону, описываемому следующим уравнением:

$$L(x) = \frac{L_p \delta_p}{\delta_p - x} = \frac{1}{a - bx}, \quad (4)$$

где L_p – индуктивность при замкнутом ЭМТУ при $\delta = \delta_p$; x – величина перемещения якоря.

Для удобства построения имитационной модели представим выражение (4) в виде

$$L(x) = \frac{1}{a - bx}, \quad (5)$$

где $a = 1/L_p$, $b = 1/(L_p \cdot \delta_p)$ – коэффициенты полинома первого порядка.

Для точного определения зависимости $L(x)$ необходим расчет магнитного поля с учетом реальной геометрии магнитопровода ЭМТУ.

Система уравнений, описывающая законы изменения тока в обмотке ЭМТУ и движение якоря электромагнита [3, 6], можно представить в следующем виде

$$\left. \begin{aligned} U &= Ri + L(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(x)}{dx} \cdot v; \\ m_{я} \frac{dv}{dt} &= \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} + m_{я} g - (F_0 + cx); \\ \frac{dx}{dt} &= v, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где U – амплитуда питающего напряжения ЭМТУ; $L(x)$ – изменение индуктивности электрической цепи электромагнита в зависимости от положения якоря; $m_{я}$ – масса якоря электромагнита; v – линейная скорость движения якоря электромагнита; F_0 и c – сила начального сжатия и жесткость тормозной пружины.

Изменение тормозного момента ЭМТУ описывается уравнением:

$$M_m = z \cdot k_{мп} \cdot R_{cp} (F_{np} - F_{эм}), \quad (7)$$

где z – число пар поверхностей трения; $k_{мп}$ – коэффициент трения; R_{cp} – средний радиус сил трения в фрикционном узле; F_{np} – осевое усилие тормозных пружин; $F_{эм}$ – электромагнитное тяговое усилие растормаживающего электромагнита.

Тяговое усилие электромагнита определяется согласно уравнению

$$F_{эм}(x) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx}. \quad (8)$$

Тогда учитывая уравнения (4) ÷ (8) и приводя систему (6) к нормальной форме Коши, получаем систему, описывающую электромагнитные и механические процессы в пружинном электромагнитном тормозном устройстве:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di}{dt} &= (a - bx) \cdot \left[U - Ri - \frac{b}{(a - bx)^2} i v \right]; \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{1}{m_{я}} \left[\frac{1}{2} i^2 \frac{b}{(a - bx)^2} + m_{я} g - F_0 - cx \right]; \\ \frac{dx}{dt} &= v; \\ M_m &= z \cdot k_{мп} \cdot R_{cp} \left(F_{np} - \frac{1}{2} i^2 \frac{b}{(a - bx)^2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $v = dx/dt$ – скорость движения якоря.

Система (9) представлена в виде, необходимом для построения имитационной модели (рис. 4) в среде Simulink [7].

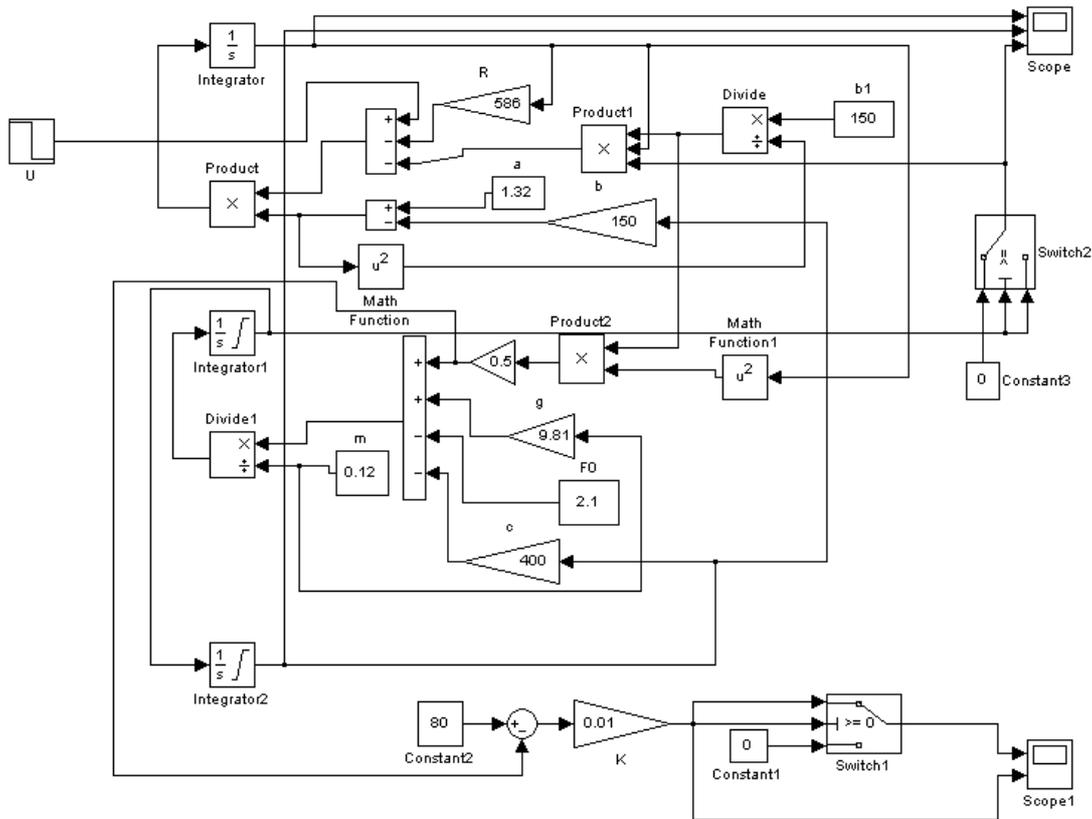


Рисунок 4 – Имитационная модель пружинного электромеханического тормозного устройства

Исследования проведены для трех случаев включения обмотки электромагнита – без форсировки, с форсировкой растормаживания по схеме включения ЭМТУ согласно рис. 7 и с форсировкой растормаживания, при котором повышенное напряжение питания на обмотку ЭМТУ подается вплоть до полного размыкания фрикционного узла [8].

Исходные данные, применяемые для построения имитационной модели ЭМТУ, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные имитационной модели ЭМТУ

U , В	R , Ом	a	b	c , Н/м	$m_{я}$, кг	F_0 , Н	z	k_{mp}	R_{cp} , м
100	586	1.32	150	400	0.12	2.1	2	0.4	0,125

Осциллограммы, иллюстрирующие переходные процессы при работе ЭМТУ без форсировки при подаче напряжения на обмотку, представлены на рис. 5. Графики изменения тока и тормозного момента ЭМТУ при включении и последующем отключении питания ЭМТУ представлены на рис. 6. Полное время размыкания фрикционного узла составляет $t_{разм} = 0,071$ с при величине тока трогания размыкания $i_{тр.разм} = 0,16$ А. Время замыкания составляет $t_{зам} = 0,063$ с при величине тока трогания замыкания $i_{тр.зам} = 0,158$ А. Данные соответствуют номинальному напряжению питания.

Расчетное изменение момента ЭМТУ (рис. 6) представляет собой решение уравнения (7). Но так как при достижении равенства между осевым усилием тормозных

пружи́н и электромагнитным тяговым усилием растормаживающего электромагнита, момент становится равным нулю и при дальнейшем увеличении электромагнитного тягового усилия, становится отрицательным, то принимается, что фактический тормозной момент (рис. 6) будет определяться только положительными величинами. При отрицательных расчетных значениях момента его фактическое значение равно нулю.

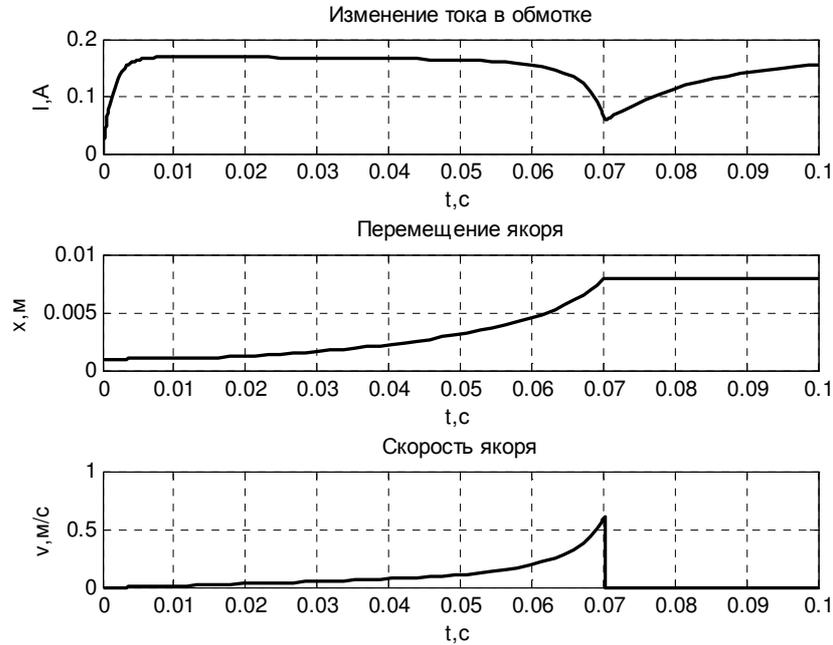


Рисунок 5 – Переходные процессы в ЭМТУ без форсировки

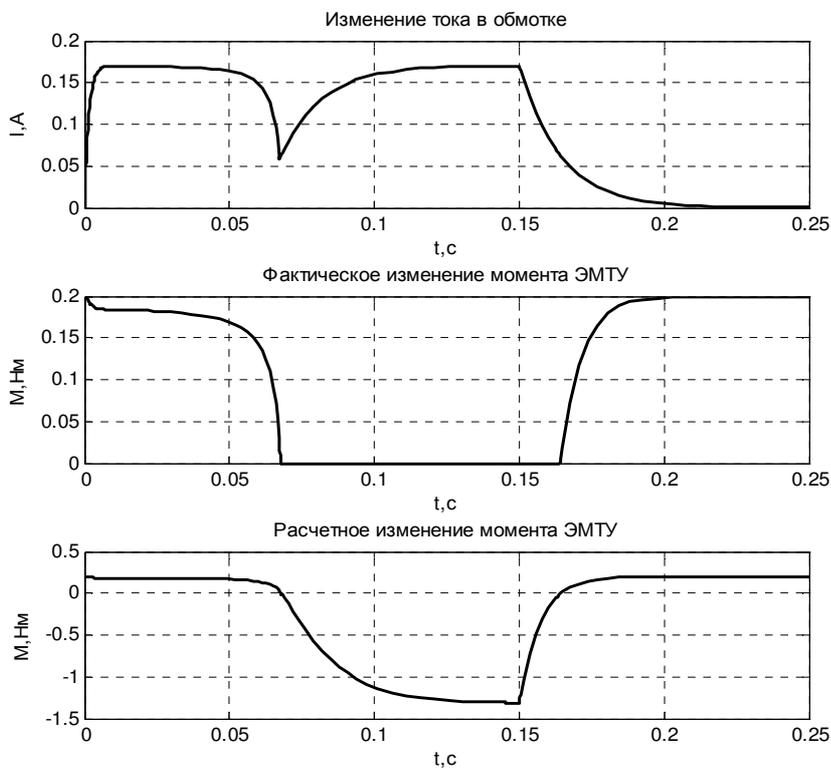


Рисунок 6 – Переходные процессы при включении и последующем отключении питания обмотки ЭМТУ

Результаты моделирования работы ЭМТУ на имитационной модели (рис. 4), приведенные на рис. 5 и 6, схожи с теоретическими зависимостями (рис. 2), что говорит о работоспособности имитационной модели.

Для комплексного улучшения технико-экономических показателей ЭМТУ целесообразно использование схем форсировки размыкания. Существует большое количество различных схем форсировки [1], которые обеспечивают улучшение параметров быстродействия ЭМТУ. В качестве схемы форсировки с использованием емкостного накопителя принимается схема, приведенная на рис. 7.

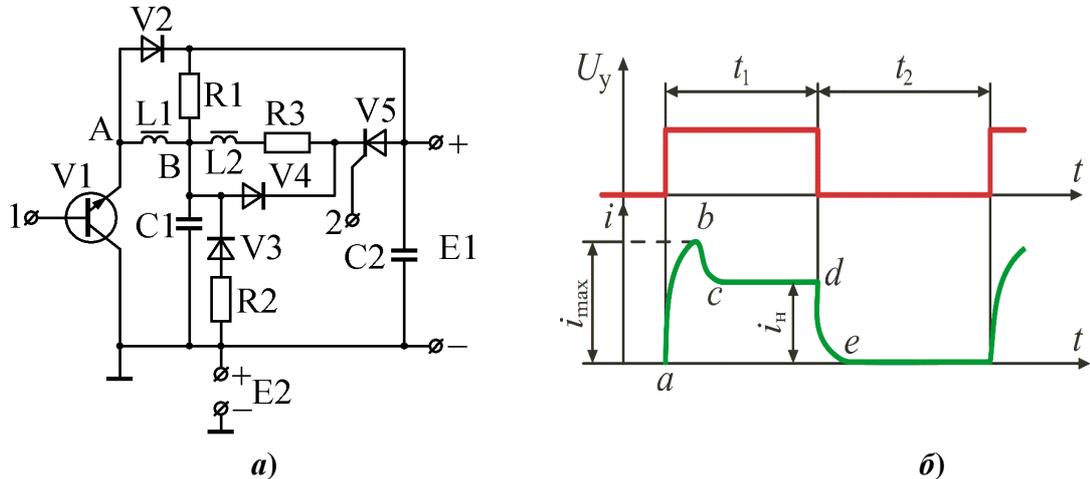


Рисунок – 7. Схема управления с предварительно заряженным конденсатором для тормозного устройства электропривода вязальных машин:
а – схема управления; *б* – графики изменения управляющего напряжения $U_y(t)$ и тока $i(t)$ в обмотке электромагнита

Подробное описание этой схемы приведено в [9]. В конкретном случае рассмотрим работу схемы в интервале времени от подачи управляющего воздействия на включение питания обмотки ЭМТУ до времени полного размыкания фрикционного узла.

Схема питается от двух источников $E1$ и $E2$, разделенных диодом $V4$, причем напряжение $E1$ больше напряжения $E2$. В исходном состоянии ключи $V1$ и $V5$ заперты, а конденсатор $C1$ заряжен через резистор $R1$ до напряжения источника питания $E1$. До такого же напряжения заряжен и конденсатор $C2$. При поступлении управляющего импульса на вход 1 транзистор открывается, то есть ключ $V1$ включается, и конденсатор $C1$ разряжается через обмотку электромагнита и переход «коллектор – эмиттер» ключа $V1$ (участок ab на рис. 7,б). При этом ток через обмотку $L1$ электромагнита нарастает до значения i_{max} . Крутизна подъема участка ab определяется напряжением конденсатора $C1$ и постоянной времени цепи его разряда. Как только напряжение на обкладке конденсатора $C1$ снизится до напряжения источника $E2$, ток через обмотку электромагнита начнет проходить от источника $E2$ через резистор $R2$, диод $V3$ и ключ $V1$ (участок cd на рис.7,б) и, соответственно, снижается до номинального значения i_n .

Параметры схемы форсировки (рис. 7,а) для применения на имитационной модели ЭМТУ следующие: напряжение питания источника $E2=U=100$ В; напряжение питания источника $E1$ находится в диапазоне [200:400] вольт и изменяется с шагом 100 В для получения ряда характеристик. Емкость конденсатора $C1$ постоянна и равна 20 мкФ. Параметры обмотки электромагнита $L1$ соответствуют исходным данным табл. 1.

Экспериментальные графики переходных процессов в обмотке и фрикционном узле ЭМТУ приведены на рисунках 8 и 9. Ряд характеристик получен при изменении напряжения $E1$ (т.е. напряжения на конденсаторе $C1$) в момент разряда на обмотку ЭМТУ.

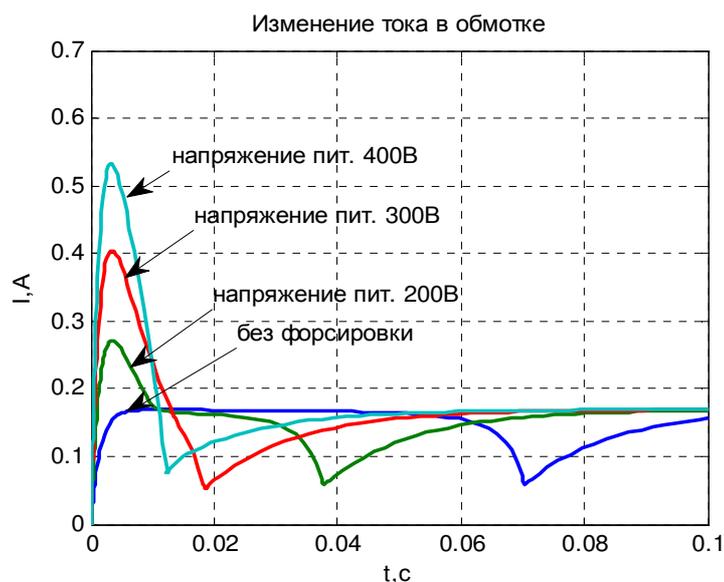


Рисунок 8 – Осциллограммы изменения тока в обмотке ЭМТУ при форсировке с использованием емкостного накопителя

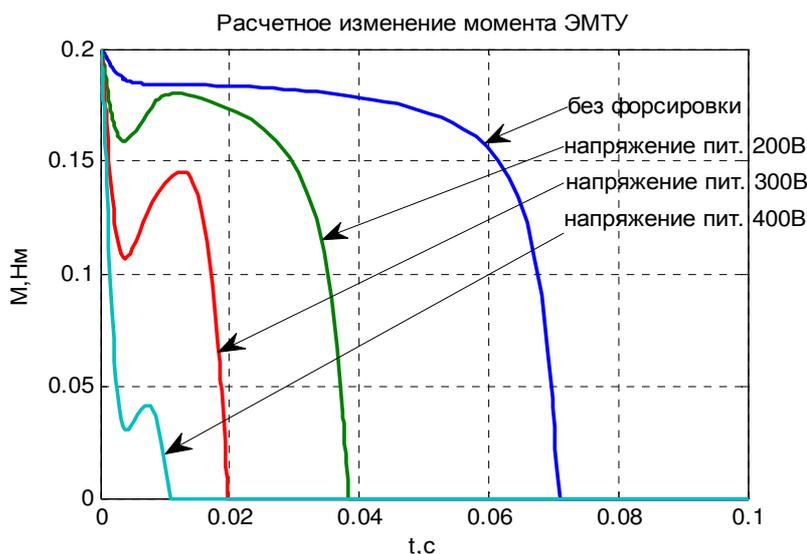


Рисунок 9 – Осциллограммы изменения тормозного момента ЭМТУ при форсировке с использованием емкостного накопителя

При разрядке конденсатора на обмотку ЭМТУ происходит скачок тока с пиком при 0,004 с (рис. 8), причем во всех случаях изменения напряжения на конденсаторе С1 (рис. 7) этот пик тока в обмотке приходится на равное время. Данный скачок приводит к увеличению электромагнитного тягового усилия растормаживающего электромагнита, поэтому на осциллограммах изменения тормозного момента ЭМТУ появляется провал, по времени совпадающий со скачком тока. Следует отметить, что во всех случаях минимальный ток в обмотке ЭМТУ в момент полного размыкания фрикционного узла повышается незначительно и находится в диапазоне [0,065;0,08] ампер.

При форсировке размыкания фрикционного узла ЭМТУ целесообразно подавать повышенное напряжение питания обмотки вплоть до полного размыкания, что можно обеспечить путем использования системы форсировки с двумя источниками питания. Данный способ форсировки реализован с помощью имитационной модели (рис. 10) которая основывается на условном операторе *if* в среде Simulink.

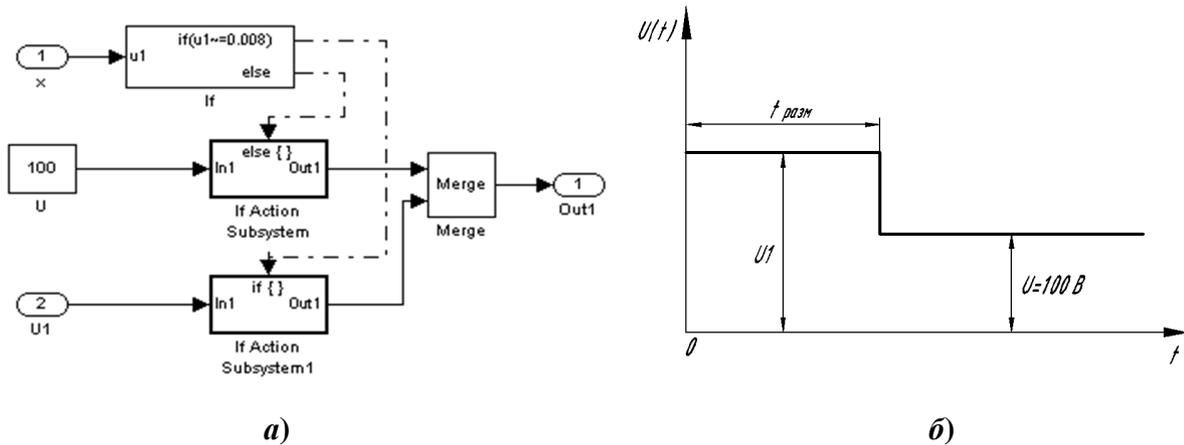


Рисунок 10 – Имитационная модель форсировки размыкания фрикционного узла

Рассмотрим работу модели (рис. 10, а) на промежутке времени от подачи команды на размыкание фрикционного узла до времени его полного размыкания. Модель образует напряжение питания обмотки ЭМТУ ступенчатого вида (рис. 10, б). В модели имеется три входных величины:

- величина перемещения якоря ЭМТУ x (рис. 10, а). Данный параметр сравнивается с величиной рабочего воздушного зазора, при достижении которого определяется время полного размыкания фрикционного узла ЭМТУ $t_{разм}$ (рис. 10,б);

- величина повышенного напряжения питания обмотки ЭМТУ $U1$ (рис. 10, а) на промежутке времени $t \in [0:t_{разм}]$ (рис. 10,б) задается величиной постоянной и при достижении времени $t_{разм}$ скачком становится равной нулю. Для получения ряда характеристик напряжение $U1$ задается в диапазоне в диапазоне [200:400] вольт и изменяется с шагом 100 В;

- величина номинального напряжения питания ЭМТУ $U = 100$ В (рис. 10, а), которая задается как постоянная величина. На промежутке времени $t \in [0:t_{разм}]$ равна нулю, при полном размыкании фрикционного узла ЭМТУ, т.е. в установившемся режиме постоянна (рис. 10,б).

Экспериментальные графики переходных процессов в обмотке и фрикционном узле ЭМТУ при применении модели (рис. 10, а) приведены на рис. 11 и 12.

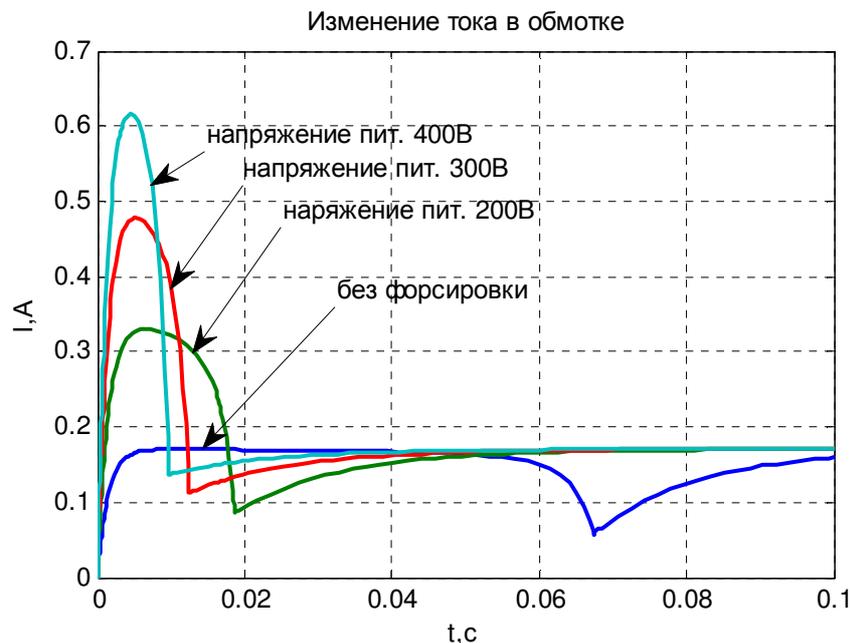


Рисунок. 11– Осциллограммы переходных процессов в обмотке ЭМТУ при подаче напряжения ступенчатого вида

В легенде графика указаны напряжения питания U_1 , которые относятся и к (рис. 11), и к (рис. 12). С использованием модели форсировки (рис. 10,а) значительно уменьшается провал тока в обмотке ЭМТУ (рис. 11) в момент времени полного размыкания фрикционного узла по сравнению с форсировкой с предварительно заряженным конденсатором.

Изменение тормозного момента ЭМТУ (рис. 12) происходит без провалов и за значительно меньшее время размыкания фрикционного узла в сравнении с графиками на рис. 9. Это свидетельствует о том, что применение форсировки с двумя источниками питания позволяет добиться плавного нарастания электромагнитного тягового усилия растормаживающего электромагнита практически с момента подачи питания на обмотку ЭМТУ.

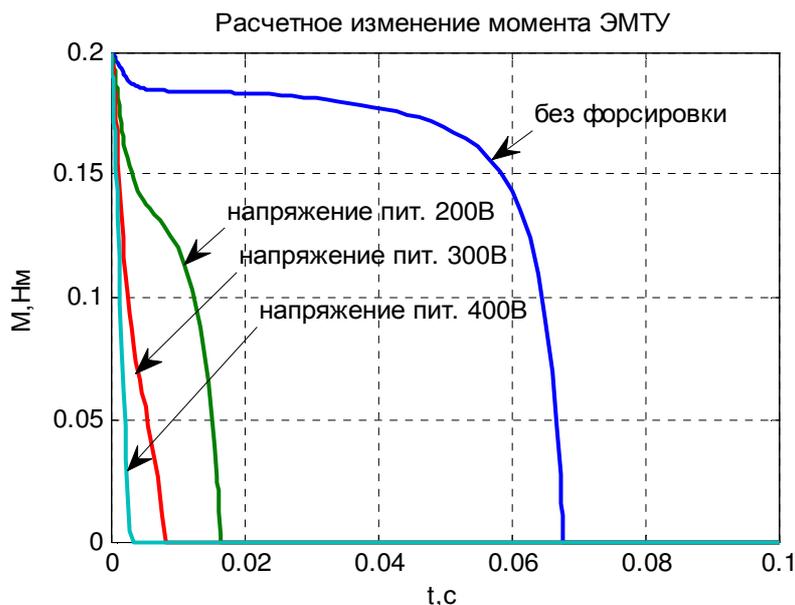


Рисунок 12 – Осциллограммы переходных процессов в фрикционном узле ЭМТУ при подаче напряжения ступенчатого вида

График изменения времени размыкания фрикционного узла ЭМТУ $t_{разм}$ от кратности форсировки $k = E_2/U$, приведен на рис. 13.

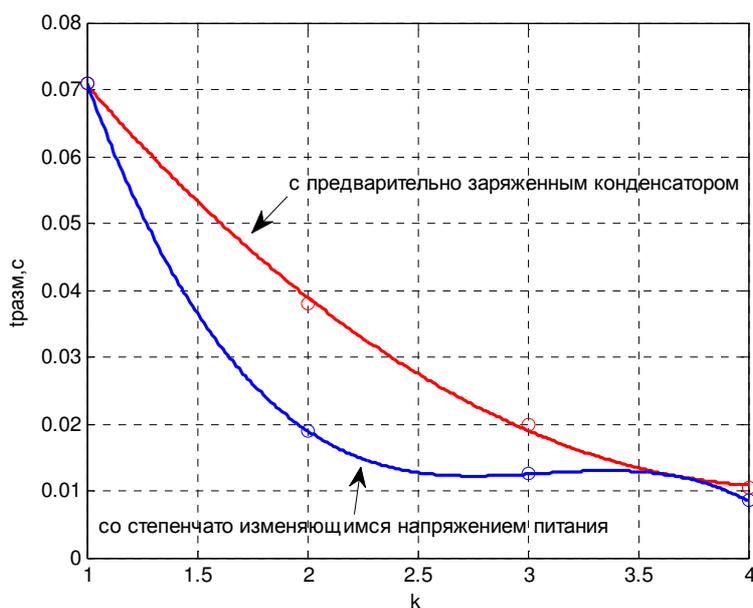


Рисунок 13 – Графики изменения времени размыкания $t_{разм}$ фрикционного узла ЭМТУ в зависимости от кратности отношения максимального напряжения к номинальному

Согласно экспериментальным данным полученным в ходе исследований процессов в ЭМТУ с использованием схем форсирования размыкания фрикционного узла получены интерполированные зависимости времени размыкания в зависимости от кратности отношения максимального напряжения к номинальному (рис. 13). Согласно данным зависимостям целесообразнее применять повышение напряжения вплоть до полного размыкания фрикционного узла ЭМТУ (рис. 10). Также следует отметить, что уменьшение времени полного размыкания фрикционного узла ЭМТУ начиная с 0,02 с в данном случае не целесообразно (рис. 13) для обоих способов форсировки.

Заключение. В результате исследования была показана практическая реализуемость имитационного моделирования пружинного электромеханического тормозного устройства в среде Simulink. Показано, что разработанные имитационные модели позволяют определить численные значения всех основных выходных параметров ЭМТУ. Получены результаты имитационного моделирования ЭМТУ в виде осциллограмм переходных процессов для различных способов управления ЭМТУ – без форсировки и при использовании схем форсированного включения. Оценена эффективность работы схем форсирования размыкания фрикционного узла ЭМТУ для двух случаев: в схеме с использованием емкостного накопителя и с использованием схемы с двумя источниками питания. Получено, что схема форсировки со ступенчатым уменьшением питающего напряжения после размыкания фрикционного узла ЭМТУ более эффективна.

Таким образом, разработанные компьютерные модели позволяют уже на стадии проектирования оценить выходные параметры и динамические характеристики ЭМТУ и выбрать наиболее целесообразную схему его управления.

Литература

1. Бочкарев И.В. Быстродействующие электромеханические тормозные устройства для электродвигателей. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 287 с.
2. Татевосян А.С., Татевосян А.А. и др. Динамика электромагнитов. – Омск: Омский государственный технический университет, 2016. – 148 с.
3. А.С. Татевосян, А.А. Татевосян, Н.В. Захарова. Расчет динамики электромагнита в программе MATLAB // Динамика систем, механизмов и машин, 2016, №2. – С. 174-180.
4. Баранов П.Р., Шараевский А.А. Расчет электромагнитного привода дисковых тормозных устройств асинхронных двигателей с заданным быстродействием // Интернет-журнал «Науковедение». 2013, № 3 (16) [Электронный ресурс]. – М.: Науковедение, 2013 г. – <http://nankovedenie.ni/sbomik6/4.pdf>.
5. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.
6. Татевосян А.С., Пимонова У.В., Поляков Д.А., Шелковников С.В., Шелковникова Ю.В. Уравнения динамики электромагнита постоянного тока и исследование его динамических характеристик // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1 (часть 1).
7. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
8. Бочкарев И.В., Галбаев, Ж.Т. Выбор топологии схемы управления электромагнитными механизмами со встроенным выпрямителем / Проблемы автоматизации и управления. – Б.: Илим, 2010. – С.143-148.
9. Лударь А.И., Рабинович Е.Б. Средства автоматизации и вычислительной техники для трикожного оборудования. – М.: Легпромбытиздат, 1989. – 296 с.