

УДК 621.3.011.31:681.532

Влияние индуктивности обмотки якоря двигателя постоянного тока на динамические свойства системы автоматического регулирования

*Болотских А.А., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Аэрокосмический факультет,
кафедра «Системы автоматического управления»*

*Научный руководитель: Зуев А.Г., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Системы автоматического управления»
bauman@bmstu.ru*

В 1834 г. Борис Семёнович Якоби построил электродвигатель, основанный на принципе притяжения и отталкивания между электромагнитами. Мощность первого двигателя составляла примерно 15 Вт, ротор совершал 80—120 оборотов в минуту, что не позволяло использовать этот двигатель с практической выгодой. Однако, в этом новом виде двигателя использовались идеи, позволившие в дальнейшем создать эффективные и универсальные двигатели постоянного тока, применяемые человеком в самых разнообразных сферах жизнедеятельности: от детских игрушек до карьерных самосвалов. Эти идеи состояли во вращательном движении якоря, наличии щёточно-коллекторного узла и использовании магнитов в подвижной и неподвижной частях электродвигателя.

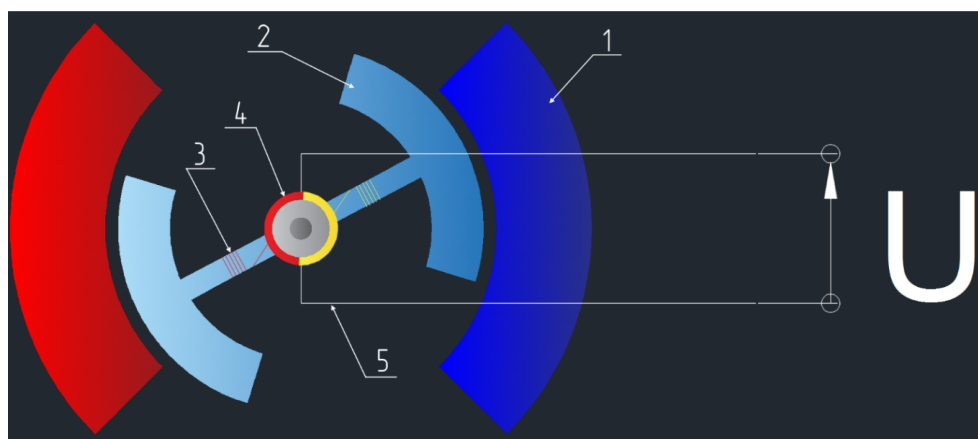


Рис. 1. Схематическое изображение двигателя постоянного тока с двухполюсным статором и с двухполюсным ротором; 1 – постоянные магниты; 2 – сердечники электромагнитов; 3 – обмотки электромагнитов; 4 – коллекторы на роторе; 5 – щётки;

В ДПТ с независимым возбуждением и управлением по цепи якоря (или со статором в виде постоянных магнитов), дифференциальное уравнение, описывающее состояние двигателя, в котором ток на якоре – входная координата, а выходная координата – угол поворота ротора, имеет суммарный порядок, равный трём. На практике, для понижения порядка уравнения до двух, часто пренебрегают индуктивностью обмотки якоря. Индуктивность обмотки определяет её полное сопротивление и, согласно правилам Кирхгофа, влияет на силу тока на якоре. При этом, ЭДС самоиндукции обмотки якоря также определяется значением индуктивности. Но при стремящемся к нулю значении индуктивности (или при пренебрежении этим параметром системы), противо-ЭДС также стремится к нулю, а полное сопротивление будет иметь только активную составляющую. Очевидно, что при отсутствии учёта этого параметра, система должна вести себя несколько иначе, чем при учёте. Исходя из этого была определена **цель исследовательской работы:**

Изучить влияние индуктивности обмотки якоря двигателя постоянного тока на его поведение.

Для достижения этой цели были поставлены и выполнены следующие задачи:

- 1) Составить принципиальные схемы и дифференциальные уравнения ДПТ с учётом и без учёта индуктивности якоря
- 2) Разработать функциональные схемы для этих двигателей
- 3) Построить модели ДПТ используя ПО Matlab и Simulink
- 4) Провести моделирование ДПТ с различным значением индуктивности и без учёта этого значения
- 5) Провести анализ полученных данных, описать поведение систем в переходном процессе
- 6) Сделать выводы о важности учёта значения индуктивности при описании ДПТ.

Актуальность данного исследования заключается:

Во-первых, в сложности быстрой оценки погрешностей, приносимых при пренебрежении индуктивностью, из-за отсутствия прямой или обратной зависимости угла поворота от этого значения.

Во-вторых, в отсутствии структурированного материала на данную тему.

В-третьих, в важности учёта индуктивности при проектировании более сложных систем, функциональным элементом которых является ДПТ.

Используя материалы учебно-методического пособия [1, с.6], составим принципиальную схему ДПТ.

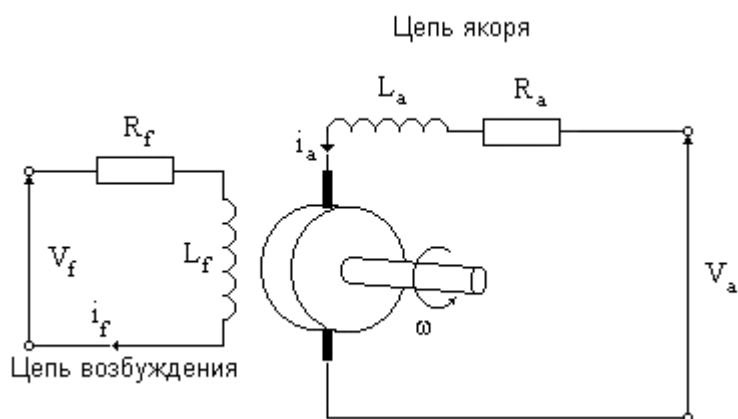


Рис. 2 . Принципиальная схема ДПТ

Рассмотрим двигатель постоянного тока с двухполюсным статором и двухполюсным ротором (см. рис.1). В простейшем случае статор представлен постоянными магнитами (рис.1,1), которые направлены разными полюсами к ротору. Электромагнитами якоря, состоящими из обмотки (рис.1,3) и ферромагнитного сердечника (рис.1,2). Щёточно-коллекторного узла, выполненного в виде двух коллекторов на роторе (рис.1,4) и щёток, прижимаемых к ротору (рис.1,5).

Обмотки обычно изготавливаются из изолированного алюминиевого или медного провода, сердечники (или магнитопроводы) – из набора листов стали, чугуна, железоникелевых или железокобальтовых сплавов, щётки – из токопроводящего материала с малым удельным сопротивлением и малым коэффициентом трения, например, графита.

При подаче напряжения на щётки, обмотка возбуждения создаёт магнитный поток, пропорциональный силе тока в обмотке:

$$\Phi = K_f i_f.$$

Развиваемый двигателем момент пропорционален как магнитному потоку, так и силе тока в якорной цепи i_a с постоянным коэффициентом K_i :

$$M = \Phi K_a i_a = K_m i_a. \quad (1)$$

При управлении по цепи якоря, момент, развиваемый двигателем, будет пропорционален силе тока в якорной цепи с постоянным коэффициентом. Силу тока в якоре можно определить согласно правилам Кирхгофа:

$$U_a = (R_a + L_a p) i_a + \varepsilon_c. \quad (2)$$

Где p – оператор дифференцирования ($p = \frac{d}{dt}$).

ЭДС самоиндукции (ε_c) пропорциональна изменению потока магнитного поля, отнесённого ко времени изменения ($\varepsilon_c = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$), и, соответственно, угловой частоте ($\varepsilon_c = K_w \omega$). При описании использовались материалы учебно-методического пособия [1, с.6-8,112].

Моделирование производилось в среде Simulink, описанной в пособии [3, с. 162]. Так, например, при моделировании был применён метод понижения порядка дифференциального уравнения, следствием из чего стало изменение выходной координаты с угла поворота (Φ , радиан) на угловую скорость ($\frac{d\Phi}{dt} = \omega$, с⁻¹).

Используя вышеназванные уравнения, составим передаточные функции структурных элементов в системе Simulink. Готовая схема будет выглядеть следующим образом (см. рис. 3).

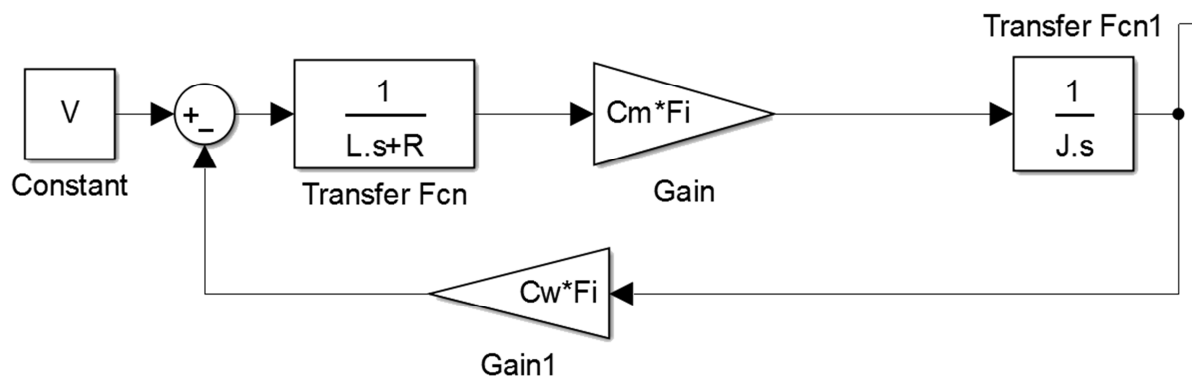


Рис. 3. Моделирование в среде Simulink

Рассмотрим подробнее структурные элементы, входящие в эту систему. Константа V – постоянное напряжение, подаваемое на якорную цепь. Затем следует сумматор, вычитающий из подаваемого напряжения ЭДС самоиндукции, возникающую в обмотке якоря.

Исходя из формулы 2, сила тока на якоре находится следующим образом $i_a = \frac{U_a - \varepsilon_c}{R_a + L_a p}$. Выходной координатой второй передаточной функции является сила тока якоря. Следующий элемент системы – усилитель, согласно формуле 1 преобразует силу тока на якоре в электромагнитный момент двигателя. Движение определяется вторым законом Ньютона $M = J \frac{\partial \omega}{\partial t}$, откуда нахождением первообразной можно найти выходной параметр ω . При нахождении первообразной, всегда существует константа C . В данном случае C следует принять равной нулю, т.к. очевидно, что при отсутствии крутящего момента, ротор не вращается. В обратной цепи рассчитывается значение ЭДС.

Составленная схема подходит для описания ДПТ с учётом индуктивности цепи якоря. Входной координатой данной системы является напряжение на якоре (также есть возможность при помощи сумматора добавить момент внешних сил), а выходной координатой – угловая скорость ротора.

При проведении моделирования использовались следующие характеристики системы: индуктивность обмотки якоря $L=0.001$, сопротивление якоря $R=0.1$, момент инерции ротора $J=10$, коэффициент пропорциональности момента двигателя силе тока в якоре $C_m=10$, коэффициент пропорциональности ЭДС самоиндукции в якоре угловой скорости якоря $C_w=10$, напряжение в якорной цепи $U=220$ В, $F_i=1$, с размерностями в системе СИ.

Выходное значение угловой скорости представлено на следующем графике (рис. 4).

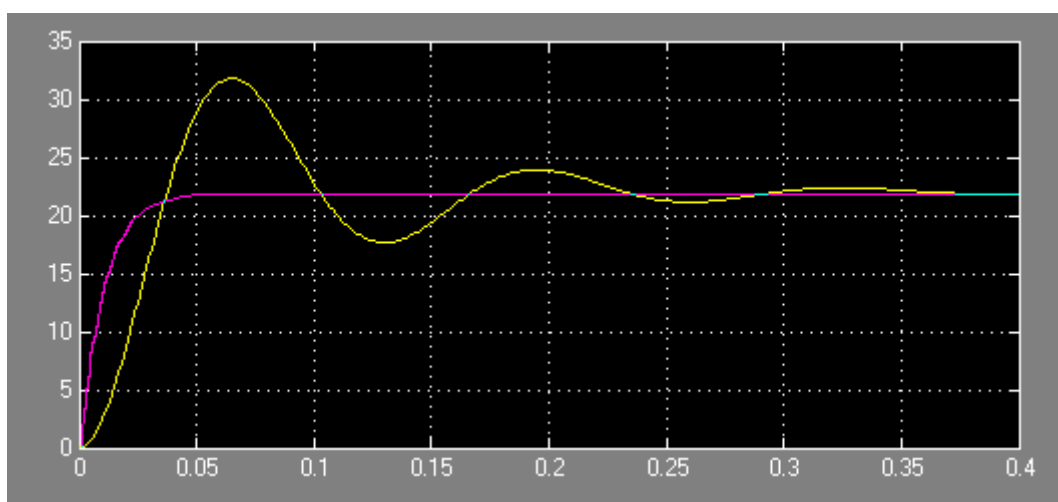


Рис. 4. График $\omega(t)$; жёлтым цветом (■) — с учётом индуктивности обмотки якоря; розовым цветом (■) — без учёта индуктивности обмотки якоря; бирюзовым цветом (■) — совпадение графиков

Модель системы без учёта индуктивности обмотки якоря будет выглядеть следующим образом (рис. 5).

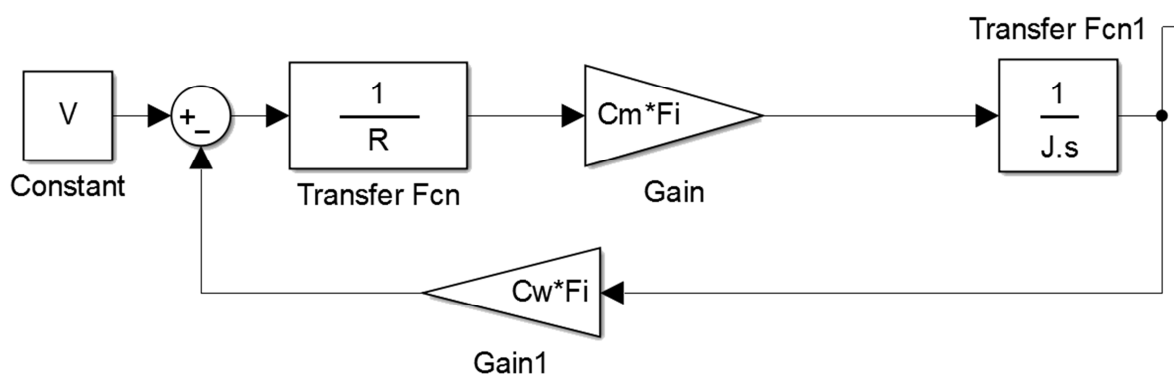


Рис. 5. Моделирование в среде Simulink, без учёта значения индуктивности

Из полученных значений можно сделать вывод, что система, не учитывающая индуктивность обмотки якоря является статической, т.е. перерегулирование и статическая ошибка отсутствуют. Время переходного процесса составляет 0.05 с.

Для получения более полного представления о влиянии индуктивности обмотки на динамические параметры системы, данные, характеризующие качество системы были записаны в таблице.

Качество системы при разных значениях индуктивности якоря			
Индуктивность, Г	Время переходного процесса, с	Перерегулирование, ρ $\text{ад} \cdot \text{с}^{-1}$	Порядок астотизма
0	0.05	0	0
0.01	0.1	3.6	0
0.02	0.26	6.7	1
0.04	0.32	9.9	1
0.06	0.38	10.62	2

Индуктивность зависит только от геометрических размеров контура и его магнитных свойств. Электромагнитный момент пропорционален количеству витков, поэтому в более мощных ДПТ значение индуктивности будет гораздо больше. Критическое значение перерегулирования и времени переходного процесса определяется из конкретных условий задачи, которую система должна выполнить.

Можно сделать следующий вывод:

Индуктивность обмотки якоря оказывает влияние на поведение динамической системы в переходном процессе, и пренебрежение этой величиной тем менее допустимо, чем более высокие требования качества установлены для рассматриваемой системы.

Список литературы

1. Сивцов В.И., Шахназаров Г.А. Практикум по основам теории управления. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 120 с.
2. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной ТАУ. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 2232 с.
3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. СПб.: ДМК, 2008. 288 с.
4. Поляков К.Ю. Теория автоматического управления для «Чайников». СПб.: Санкт-Петербург, 2008. 80 с.