

УДК 621.31

Анализ временных характеристик переходных процессов в цепи управления шаговым двигателем

Березин А.С. ¹, Пояцыка О.С. ²

^{1,2}Студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Научный руководитель: Ситников А.В., ст. преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники» МГТУ им. Баумана, г. Москва, Россия

МГТУ им. Баумана

inon.berezin@yandex.ru

Olesa13@yandex.ru

Шаговый двигатель (ШД) представляет собой электромеханическое устройство преобразующее электрические импульсы в дискретный поворот или линейное перемещение подвижной части машины (ротора, якоря). Принцип действия ШД основан на взаимодействии магнитного поля, создаваемого в обмотках двигателя системой управления и магнитного поля, создаваемого, например, постоянными магнитами, расположенными на роторе (шаговый двигатель с постоянными магнитами). ШД позволяют создавать системы автоматического регулирования, не нуждающиеся в обратных связях, и применяются в автоматических устройствах дискретного действия совместно с электронными коммутаторами. Последовательность и частота переключения обмоток формируются схемой управления и определяют скорость и направление вращения ротора.

К достоинствам ШД относятся:

- высокая точность обеспечения угла поворота ротора;
- в статическом режиме двигатель сохраняет полный момент на валу;
- высокая надежность работы, большое время наработки на отказ ввиду отсутствия щеточного узла;
- гибкая система управления, следовательно, большой диапазон развиваемых скоростей, быстрая остановка, реверсирование.

Однако шаговые двигатели обладают рядом существенных недостатков:

- сложная система управления;
- возникновение высокого напряжения на коммутирующих элементах при переключении обмоток;
- большая потребляемая мощность в статическом режиме;
- срыв управления (пропуск шага) при возникновении резонансных явлений в электромеханической системе;
- относительно низкая скорость нарастания момента при подаче управляющего импульса.

Актуальность задачи анализа временных характеристик переходных процессов в цепи управления ШД

Скорость нарастания электромагнитного момента, развиваемого двигателем при подаче на обмотку импульса управляющего напряжения, зависит от скорости нарастания тока в обмотке. Эта скорость может характеризоваться постоянной времени цепи τ . С увеличением частоты следования управляющих импульсов среднее значение момента ($M_{\text{ср}}$) на валу ШД падает. Чем больше τ , тем до меньшей величины за время импульса напряжения нарастает ток, а, следовательно, и магнитный поток обмоток управления, что и снижает $M_{\text{ср}}$. Еще одним важным обстоятельством в работе системы управления шаговым двигателем является возникновение переходных процессов в цепи, содержащей катушку индуктивности (обмотку). В момент прихода заднего фронта управляющего импульса (разрыва цепи) на коммутирующем элементе (например, биполярном транзисторе) возникает напряжение очень большой величины. Это может привести к выходу его из строя. Поэтому задача анализа переходных процессов в цепи управления ШД представляется очень актуальной.

Структурная схема системы управления шаговым двигателем и ее анализ

Упрощенная типовая структурная схема управления шаговым двигателем в двухобмоточном исполнении изображена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема управления двухобмоточным шаговым двигателем

С выхода блока формирования сигналов управления (как правило, это электронное устройство микропроцессорного типа), на управляющие входы коммутирующих элементов 1 и 2 подаются сигналы управления 1 и 2, представляющие собой последовательности импульсов, сдвинутых по фазе на 180° . Период следования этих импульсов определяет скорость вращения ротора ШД.

Коммутирующие элементы 1 и 2 управляют подключением обмоток L_1 и L_2 двигателя к питающей шине $+U_{\text{п}}$. Чаще всего в качестве коммутирующих элементов используются биполярные транзисторы средней и большой мощности, работающие в ключевом режиме.

Разнообразие схем управления велико, однако неизменным для всех остается коммутация цепей, содержащих катушки индуктивности (обмотки ШД) прямоугольными импульсами. Такой режим работы катушек приводит к ряду нежелательных, а порой и аварийных явлений в электрической цепи.

Ток, протекающий через катушку, не может измениться скачкообразно. Это является следствием интегральных свойств этого элемента:

$$i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt,$$

где i_L - ток, протекающий через катушку индуктивности L ;

u_L - напряжение на катушке.

Рассмотрим простейшую RL цепь, работающую при ступенчатом входном воздействии (рис. 2).

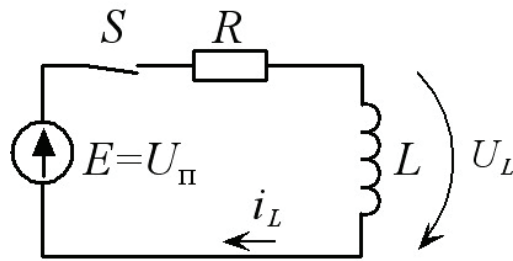


Рис. 2. RL цепь при ступенчатом входном воздействии

Ключ S моделирует ступенчатое входное воздействие, резистор R – активное сопротивление катушки индуктивности L (обмотки), E – источник напряжения.

До коммутации (время $t = 0_-$) ключ замкнут, цепь работает на постоянном токе ($E = U_n = \text{const}$, $i_L = \text{const}$) и напряжение на катушке равно нулю: $U_L = L \frac{di_L}{dt} = 0$. Ток в цепи: $i_L = E/R$.

При размыкании ключа (время $t = 0_+$) схема принимает вид (рис. 3):

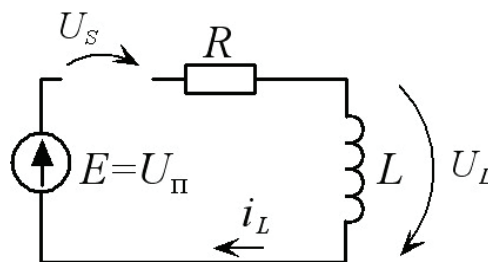


Рис. 3. RL цепь после коммутации

Напряжение на коммутирующем элементе U_S (с учетом законов коммутации $i_L(0_-) = i_L(0_+) = E/R$) может достигать очень большого значения (в идеальном случае равного бесконечности). Такое явление приводит к выходу из строя коммутирующего элемента (транзистора) или к возникновению дугового разряда в случае использования механического ключа.

Для того, чтобы избежать описанного выше явления, необходимо предпринимать специальные меры, к которым можно отнести:

- включение в цепь параллельно катушке конденсатора ;
- включение в цепь диода, формирующего цепь разряда катушки при коммутации;

- управление коммутирующим устройством не ступенчато, а, например, по синусоидальному закону (микрошаговый режим работы ШД).

Каждый из перечисленных методов имеет свою специфику и влияет на устойчивость работы двигателя. Одной из основных характеристик ШД является скорость нарастания электромагнитного момента при подаче на обмотки управляющих импульсов (ее еще называют жесткостью электромеханической системы). Для оценки этой характеристики используют понятие постоянной времени электромеханической системы (τ), которая определяется, как время, за которое свободная составляющая переходного процесса уменьшается в e (2.71) раз. Чем меньше τ , тем быстрее заканчивается переходный процесс.

Рассмотрим влияние элементов системы управления шаговым двигателем на постоянную времени цепи.

Для простейшей RL цепи (рис. 2) можно записать характеристическое уравнение:

$$R + Ls = 0,$$

где s – оператор Лапласа. Решив уравнение относительно s , получим корень характеристического уравнения: $s = -\frac{R}{L}$, тогда постоянная времени цепи будет:

$\tau = \frac{1}{|s|} = \frac{L}{R}$ [с]. Для значений $R = 2$ [Ом], $L = 1$ [мГн]: $\tau = \frac{L}{R} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{2} = 0.5$ [мс]. Таким образом, с помощью увеличения активного сопротивления в цепи управления ШД можно добиться снижения τ . Это наиболее простой, но не самый оптимальный способ улучшения характеристик работы двигателя, т.к. введение дополнительного сопротивления уменьшит ток, протекающий через обмотку и, следовательно, снизит момент, развиваемый двигателем. К тому же, введение дополнительного сопротивления (при сохранении тока на одном уровне) приведет к существенному нагреву системы, т.е. к снижению к.п.д.

Рассмотрим теперь влияние паразитных емкостей, имеющих в системе управления. Для любой реальной катушки индуктивности кроме активного сопротивления характерно наличие межвитковой емкости, которая очень мала (порядок ее – десятки пикофарад), но на высоких частотах и при ступенчатом входном воздействии она может заметно влиять на работу электрической цепи. На рис. 4 представлена электрическая цепь управления с учетом межвитковой емкости (C).

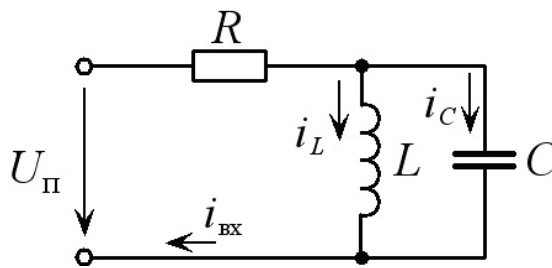


Рис. 4. RLC цепь управления ШД

Характеристическое уравнение такой цепи имеет вид:

$$R + \frac{Ls \frac{1}{Cs}}{Ls + \frac{1}{Cs}} = 0.$$

Цепь имеет второй порядок, корней характеристического уравнения будет два:

$$s_{1,2} = \frac{-\frac{1}{RC} \pm \sqrt{(\frac{1}{RC})^2 - \frac{4}{LC}}}{2}.$$

Постоянную времени цепи можно рассчитать по формуле:

$$\tau = \frac{2}{\left| -\frac{1}{RC} \pm \sqrt{(\frac{1}{RC})^2 - \frac{4}{LC}} \right|}.$$

Подставив в это уравнение значения $R = 2$ [Ом], $L = 1$ [мГн], $C = 20$ [пФ], получим

$$\tau = \frac{2}{\left| -\frac{1}{2 \cdot 20 \cdot 10^{-12}} \pm \sqrt{(\frac{1}{2 \cdot 20 \cdot 10^{-12}})^2 - \frac{4}{10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-12}}} \right|} = 0.45 \text{ [мс]}.$$

Интерес могут представлять графики зависимости постоянной времени цепи от активного сопротивления цепи и от емкости (как межвитковой, так и конденсатора, включаемого в цепь с целью снижения напряжения на коммутирующем элементе). На рис. 5 изображен график $\tau = f(R)$, на рис. 6 - $\tau = f(C)$.

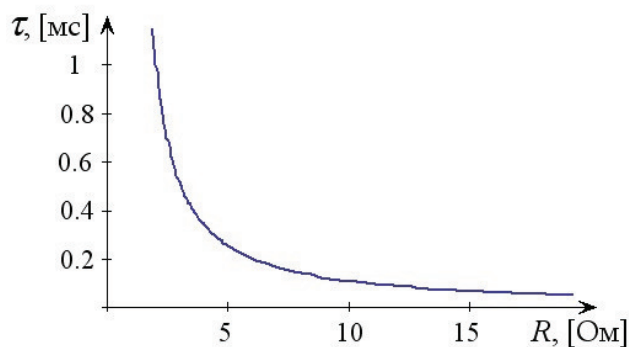


Рис. 5. График зависимости постоянной времени цепи от активного сопротивления

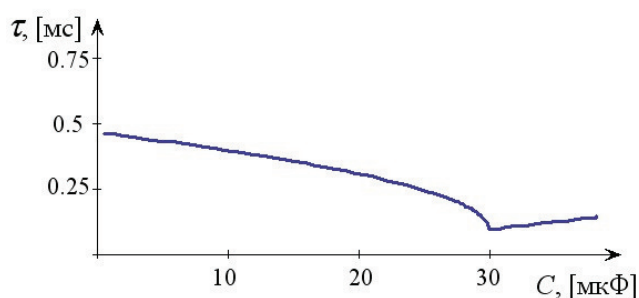


Рис. 6. График зависимости постоянной времени цепи от емкости

Для снижения напряжения на коммутирующем элементе (транзисторе) в момент прихода управляющего импульса параллельно коммутирующему элементу включают диод, который называют шунтирующим или гасящим. При размыкании ветви обмотки ШД гасящий диод открывается, создавая ветвь разряда катушки.

Рассмотрим влияние диода (вернее емкости и сопротивления открытого p - n -перехода) на вид и характеристики переходного процесса, возникающего в цепи обмотки. Схему управляющей ветви ШД можно представить в виде (рис.7):

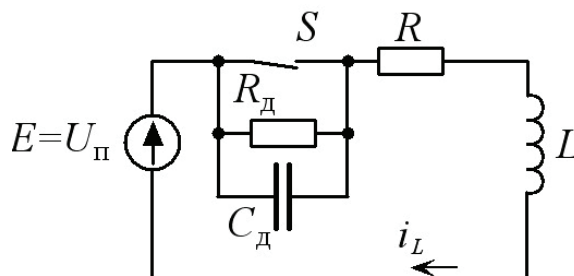


Рис. 7. Схема управляющей цепи ШД с учетом емкости и сопротивления p - n -перехода открытого гасящего диода

На схеме обозначены:

C_d – емкость открытого диода;

R_d – сопротивление открытого диода;

R – активное сопротивление обмотки ШД;

L – индуктивность обмотки ШД.

Для схемы рис. 7 характеристическое уравнение будет иметь вид:

$$Ls + R + \frac{R_d \frac{1}{C_d}}{R_d + \frac{1}{C_d}} = 0.$$

Корни этого характеристического уравнения:

$$s_{1,2} = \frac{-L - RR_d C_d \pm \sqrt{(L + RR_d C_d)^2 - 4R_d C_d L(R + R_d)}}{2LR_d C_d}.$$

Определим τ , подставив значения $R = 2$ [Ом], $R_d = 10$ [Ом], $L = 1$ [мГн], $C_d = 200$ [пФ]:

$$\tau = \left| \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 200 \cdot 10^{-12}}{-10^{-3} - 2 \cdot 10 \cdot 200 \cdot 10^{-12} + \sqrt{(10^{-3} + 2 \cdot 10 \cdot 200 \cdot 10^{-12})^2 - 4 \cdot 10 \cdot 200 \cdot 10^{-12} 10^{-3} (2 + 10)}} \right| =$$

$$= 2.05 \cdot 10^{-4} [c] = 0.5 [\text{мкс}].$$

Графики зависимостей $\tau = f(R)$ и $\tau = f(C_d)$ приведены на рис. 8 и рис. 9:

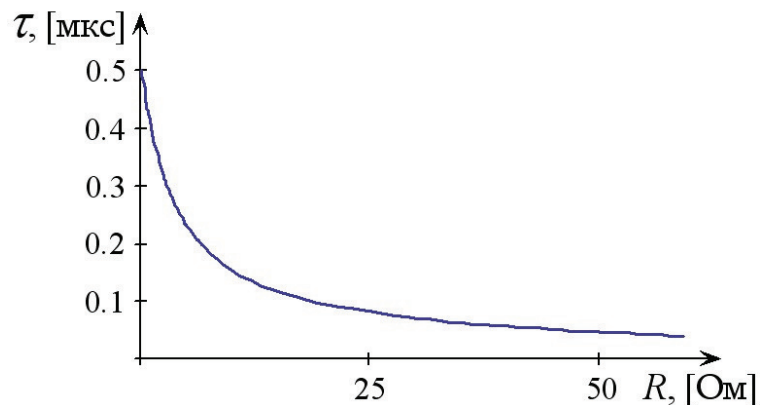


Рис.8. График зависимости постоянной времени цепи от активного сопротивления R

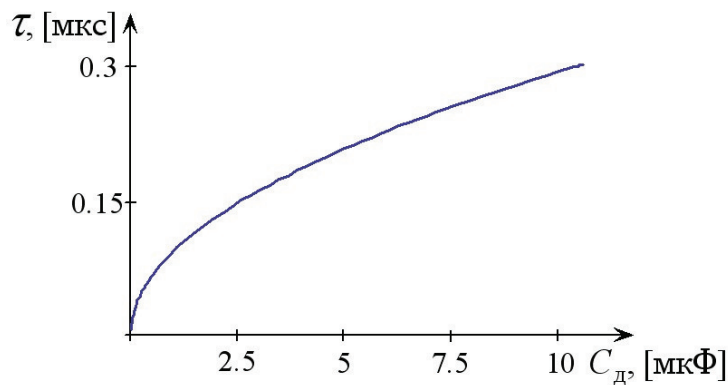


Рис. 9. График зависимости постоянной времени цепи от емкости C_d

Таким образом, введение в цепь управления диода приводит к уменьшению величины постоянной времени цепи. Однако увеличение паразитной емкости $p-n$ -перехода может приводить к ухудшению характеристик двигателя (рис. 9). Для компенсации этого явления в цепь включают дополнительный шунтирующий конденсатор $C_{ш}$ (рис. 10).

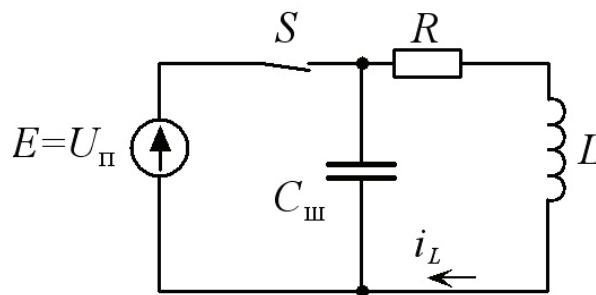


Рис. 10. Схема управляющей цепи ШД с шунтирующим конденсатором $C_{ш}$

Емкость конденсатора $C_{ш}$ выбирается от единиц до сотен микрофард. Часто выбор номинала конденсатора не подкрепляется какими-либо теоретическими выкладками, сделать которые, однако не сложно. Рассмотрим влияние величины емкости шунтирующего конденсатора на характеристики переходного процесса, возникающего в цепи управления. Характеристическое уравнение для схемы рис. 10 будет следующим:

$$R + Ls + \frac{1}{C_{ш}s} = 0.$$

Его корни: $s_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC_{ш}}}$ будут комплексно-сопряженными при соблюдении условия $C_{ш} < \frac{4L}{R^2}$, т.е. при этом условии в цепи возникает колебательный переходной процесс, для которого можно определить следующие характеристики:

Затухание $\delta = -\frac{R}{2L}$, частота свободных колебаний $\omega_{св} = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC_{ш}}}$. Подставляя

значения

$R = 2$ [Ом], $L = 1$ [мГн], $C = 200$ [мкФ], рассчитаем частоту свободных колебаний:

$$f_{св} = \frac{\omega_{св}}{2\pi} = \frac{\sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC_{ш}}}}{2\pi} = \frac{\sqrt{\frac{2^2}{4 \cdot 10^{-6}} - \frac{1}{10^{-3} \cdot 200 \cdot 10^{-6}}}}{2\pi} = 11.253 \text{ [кГц]}. \text{ Электрические колебания в}$$

цепи управления шаговым двигателем могут привести к возникновению резонансных явлений электромеханической системы и, как следствие этого, к срыву управления двигателем, что подтверждается исследованиями устойчивости работы шагового двигателя [1].

На основании вышеизложенных расчетов, можно сделать следующие выводы:

- при определении характеристик работы шагового двигателя необходимо учитывать наличие в цепи паразитных емкостей, т.к. их влияние на временные характеристики может быть существенным;

- включение в цепь управления шунтирующего конденсатора может привести к срыву управления на килогерцовых частотах (среднечастотная нестабильность);

- коммутация цепи, содержащей катушку индуктивности (обмотку ШД) приводит к возникновению огромного напряжения на коммутирующем элементе.

Предложенный же несложный математический аппарат позволяет сделать расчеты временных характеристик, спрогнозировать возникновение нежелательных режимов в системе сервопривода шагового двигателя и предпринять меры (аппаратные или программные) для их исключения.

Список литературы

1. Кацман М.М. «Электрические машины. Учебник», М., 2003 г.
2. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств // М., «Высшая школа» 1976.
3. Касаткин А.С, Немцов М.В. Электротехника // М., 1995.
4. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники: учебник для втузов/ 5-е изд., испр. // М. Энергия, 1978.
5. Златенов П.Н, Новиков П.Н, Шапкин Е.В Электротехника и Электроника // М., «Высшая школа» 1991.
6. Bezmen, P. Mathematical Modeling of Watching Electrical Drives / P. Bezmen, D. Tuladhar // International Conference on the Teaching of Mathematical Modelling and Applications: proceedings - Kathmandu (Nepal): Kathmandu University, 2007.

7. Тхеин Лин У. Система управления шагового двигателя для перемещения солнечной рамы энергетической установки// «Научно-технический журнал «Естественные и технические науки» М.: Изд-во «компания Спутник», №1, 2009».
8. Каляева А.А, Мазур А.Я. Электрические машины // Минск., 1971.
9. Усов В.В. Метод ускоренного контроля пусковых характеристик шаговых двигателей// Научные труды Винницкого технического университета №2, Винница, Наукові прці, 2009.