

В. В. Усов

МЕТОД УСКОРЕННОГО КОНТРОЛЯ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В работе разработан новый метод контроля зависимости пускового момента шаговых двигателей от частоты напряжения питания, что позволяет увеличить быстродействие, путем полной автоматизации измерительного процесса.

Ключевые слова: пусковой момент, шаговый двигатель, контроль, измерение, быстродействие MathCad, .NET Framework.

Введение

Одной из основных характеристик шаговых двигателей (ШД) является зависимость пускового момента от частоты управляющих импульсов. Эта зависимость определяет диапазон значений момента нагрузки, при которой двигатель способен запускаться без потери шагов для разных частот напряжения питания. Поэтому данная характеристика является главным показателем нагружающей способности ШД в процессе пуска и остановки [1, 2].

Во время испытания ШД важной является задача измерения его характеристик. Для этого, в настоящее время, применяются ряд методов, которые основаны на ручном контроле момента двигателя в диапазоне пусковых частот напряжения питания [1]. Однако, с

развитием измерительной техники и появлением новых типов ШД существующие методы и средства измерения на их основе не отвечают современным требованиям и объектам контроля. Поэтому актуальным является совершенствование и разработка новых подходов к измерению пусковых характеристик. В первую очередь, для этого следует провести анализ известных методов и определить основные недостатки, которые не позволяют их последующее эффективное использование.

Анализ известных методов и средств измерения пусковых характеристик ШД

Наиболее известным является метод измерения пусковых характеристик ШД, который заключается в использовании пружинного динамометра как сенсора вращательного момента

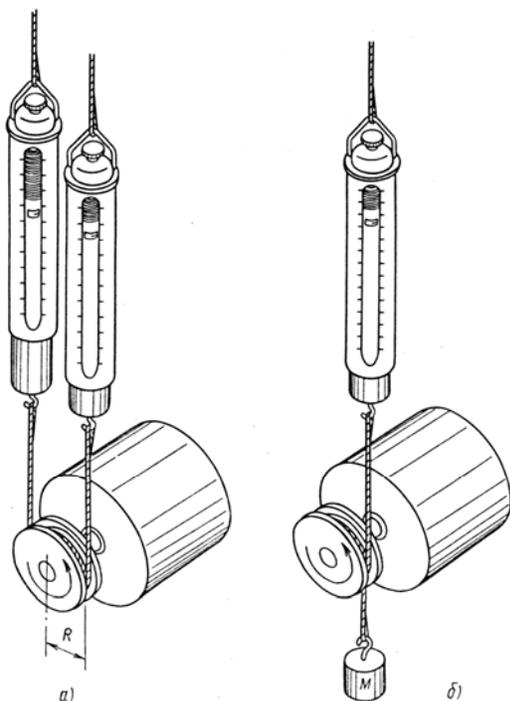


Рис. 1. Измерение пускового момента ШД с помощью шкал динамометров (а – с двумя шкалами, б – с одной шкалой)

(рис. 1). При этом важным является уравнивание ротора ШД дополнительным моментом нагрузки, который создается еще одним

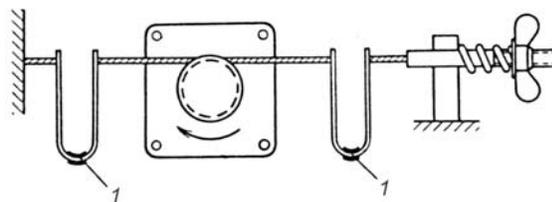


Рис. 2. Измерение пускового момента ШД с помощью тензосенсоров 1

динамометром (рис. 1а) или грузом, подвешенным к шкиву на стальной нити [1].

Невзирая на то, что груз создает постоянный момент нагрузки, в результате вращения ротора ШД струна с грузом растягивается и колебается. Поэтому момент нагрузки и соответственно показания динамометра будут нестабильными, что снижает точность измерения. Кроме того, наличие человека в измерительном процессе вызывает дополнительную субъективную погрешность и делает невозможной автоматизацию измерения.

Вместо пружинных динамометров для измерения пускового момента также применяются тензорезистивные сенсоры 1 (рис. 2). При этом момент ШД определяется как разница показаний тензосенсоров, которые включаются в мостовые схемы [1].

В этом случае, момент нагрузки создается за счет силы трения троса, который не является постоянным и зависит от скорости вращения вала, которая изменяется при переходе от одного устойчивого положения к следующему.

Тензорезистивный метод позволяет провести измерение пускового момента ШД с высокой точностью, а также осуществить преобразование его в удобной форме. Для снятия пусковой характеристики момент нагрузки постепенно увеличивается до тех пор, пока двигатель не сможет запуститься при данной частоте, то есть момента ШД будет не достаточно для преодоления сопротивления. При этом равновесие моментов фиксируется визуально оператором, что не позволяет автоматизировать процесс измерения.

Кроме того, рассмотренные методы и средства, решая проблему измерения пускового момента, не рассматривают вопроса контроля как установление соответствия измеряемой величины заданным нормам [3]. Поэтому, учитывая указанные недостатки существующих методов, проблемы измерения момента и контроля пусковых характеристик ШД, необходимо осуществить поиск новых подходов и технических решений, прежде всего, на методологическом уровне.

Следовательно, целью данной работы является повышение быстродействия измерения пускового момента ШД.

Проанализировав рассмотренные методы и средства, можно выделить следующие задачи, которые необходимо решить при исследовании проблем контроля пусковых характеристик ШД:

1. Установить критерий выхода из синхронизма ШД в момент пуска при перегрузке;
2. Провести математическое моделирование пусковой характеристики ШД;
3. Разработать метод ускоренного контроля пускового момента ШД.

Разработка метода ускоренного контроля пускового момента

Как отмечалось выше, основным признаком ШД при пуске является его способность находиться в синхронизме при заданной нагрузке и частоте напряжения питания. Максимально возможный момент нагрузки для всего частотного диапазона и будет пусковой характеристикой ШД. Максимальный момент двигателя достигается на грани выхода его из синхронизма, поэтому важно его обнаружить. В рассмотренных устройствах это осуществляется за счет визуального наблюдения, которое является неудовлетворительным, учитывая принцип автоматизации измерения. Потому следует разработать новый критерий, который позволит проводить данную операцию в автоматическом режиме. Для этого осуществим математическое моделирование работы ШД в пусковом режиме, воспользовавшись моделью, которая представлена в [1, 4]:

$$\begin{cases} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + pn\Phi_m i_A \sin(p\theta) + pn\Phi_m i_B \sin(p(\theta - \lambda)) - M_H = 0, \\ V_{gA} - r \cdot i_A - L \cdot \frac{di_A}{dt} - M \frac{di_B}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p\theta)] = 0, \\ V_{gB} - r \cdot i_B - L \cdot \frac{di_B}{dt} - M \frac{di_A}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p \cdot (\theta - \lambda))] = 0, \\ M_n = -nN_r \Phi_M \cdot [i_A \cdot \sin(N_r \cdot \theta) + i_B \cdot \cos(N_r \cdot \theta)], \end{cases} \quad (1)$$

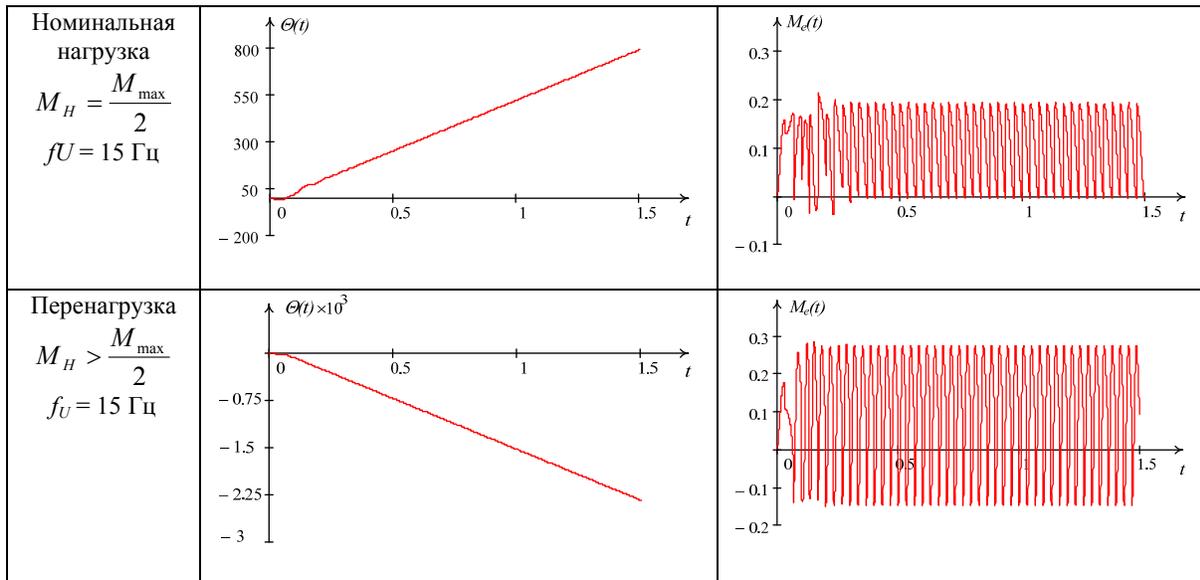
где V_{gA}, V_{gB} – напряжение питания, соответственно фазы A и B ; i_A, i_B – ток в обмотках фаз; $n\Phi_m$ – потокосцепление; L – собственная индуктивность каждой фазы; M – взаимная индуктивность; r – сопротивление обмотки статора; N_r – количество зубцов ротора; p – число пар полюсов; n – количество витков обмотки; J – момент инерции; D – коэффициент вязкого трения; θ – угол поворота ротора относительно статора; λ – шаг зубцов статора ШД; M_n – электромагнитный момент ШД; M_H – момент нагрузки.

Используя исследования, приведенные в [3], представим результаты решения (1) в пакете прикладных программ MathCad для двухфазного ШД типа М35SP-6 в трех режимах работы при разных частотах напряжения питания f_U (табл. 1).

Таблица 1

Моделирование переходных процессов ШД

Режим	Переходной процесс угла поворота $\theta(t)$	Переходной процесс пускового момента $M_i(t)$
Холостой ход $M_H = 0$ $f_U = 1$ Гц		
Номинальная нагрузка $M_H = \sqrt{2} \cdot M_{max}$ $f_U = 1$ Гц		
Перенагрузка $M_H > \sqrt{2} \cdot M_{max}$ $f_U = 1$ Гц		



Как видно из табл. 1, при действии момента нагрузки, который превышает $\sqrt{2} \cdot M_{\max}$ (M_{\max} – максимальный синхронизирующий момент), ШД вращается в обратном направлении. Это свидетельствует о том, что при данной частоте напряжения питания ($f_U = 1$ Гц) момента ШД недостаточно для его запуска, а прилагаемая нагрузка превышает пусковой момент. При этом предельное значение момента нагрузки

$$M_{n.\max} = \sqrt{2} \cdot M_{\max} \tag{2}$$

является максимальным пусковым моментом при данной частоте напряжения питания.

Режим работы при перегрузке характеризуется выходом ШД из синхронизма, при этом значения пускового момента для разных частот отличаются. Однако похожим является переходной процесс угла поворота, который отмечается стремительным вращением вала ШД в направлении действия момента нагрузки. Очевидно, данная формулировка не дает четкого представления об условии выхода ШД из синхронизма при перегрузке. Ведь как видно из табл. 1, для режимов холостого хода и нагрузки, в области низких частот, ротор двигателя также скачкообразно изменяет направление вращения, которое свидетельствует о неоднозначности указанного утверждения. Потому следует осуществить уточнение таким образом, чтобы условие выхода ШД из синхронизма было не только однозначным, но и в дальнейшем давало возможность реализовать его как средство контроля пускового момента.

При перегрузке ШД важным фактом является не только стремительное вращение вала в направлении действия момента нагрузки, но и длительность вращения. При переходе от одного углового положения к следующему длительность колебаний не превышает полпериода напряжения питания. В момент выхода из синхронизма (табл. 1) угол поворота ШД не изменяет свое направление, а его длительность, очевидно, превышает полупериод напряжения питания.

Следовательно, основным критерием выхода из синхронизма ШД при перегрузке является вращение вала в направлении действия нагрузки за время t_n , что превышает полупериод напряжения питания $T_U / 2$, то есть

$$t_n > \frac{T_U}{2} \tag{3}$$

Реализация данного критерия возможна за счет программной обработки угла поворота во время переходного процесса, после предыдущего его измерительного преобразования с помощью сенсора угла.

Пусковые характеристики относятся к классу кривых вращений и представляют собой

область старта на рис. 3. Общая теория, что описывают данные характеристики [1, 5], имеет ряд недостатков, в частности, не учитываются зоны нечувствительности и нестабильности, которые определяются экспериментальным путем, наличие предположений и упрощений в расчетах аналитической зависимости $M(f)$. Поэтому актуальной является задача математического моделирования пусковых характеристик.

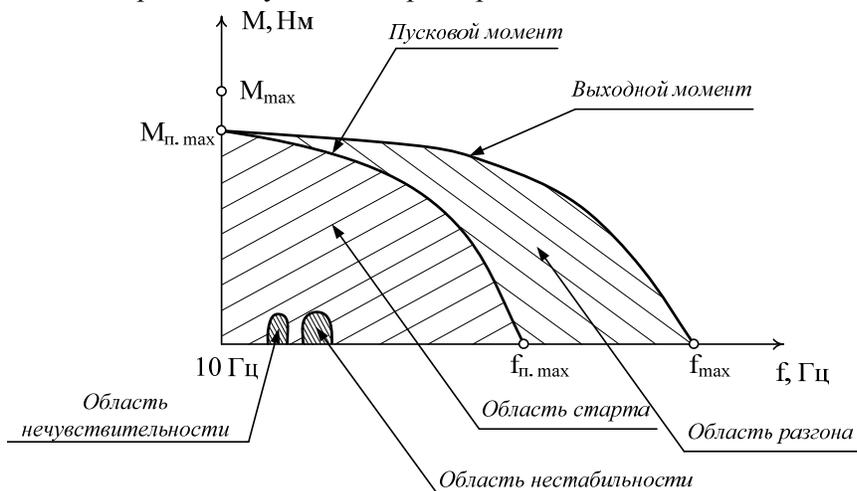


Рис. 3. Пусковая и выходная характеристики ШД

Главная идея моделирования зависимости пускового момента ШД от частоты напряжения питания заключается в самом определении данной характеристики. То есть, следует определить такой максимальный момент нагрузки для каждого значения частоты напряжения питания в пусковом диапазоне, при котором ШД остается в синхронизме и способный вращаться в заданном направлении и останавливаться. Дана операция возможна после решения математической модели (1) при применении разработанного критерия выхода ШД из синхронизма.

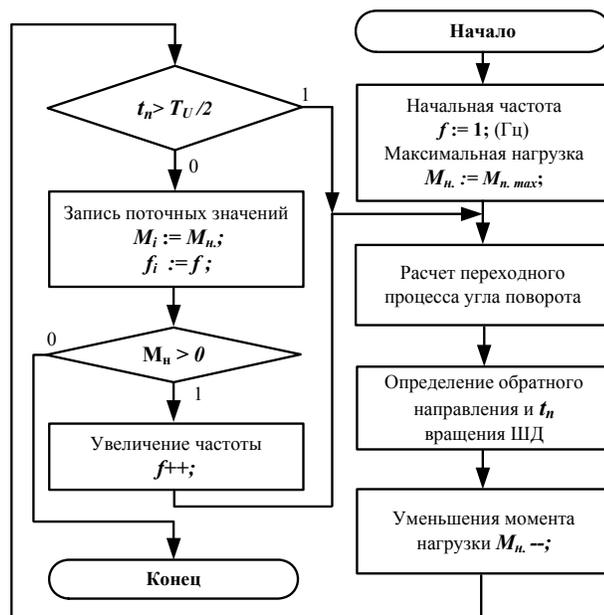


Рис. 4. Алгоритм моделирования пускового момента

Следовательно, предлагается такой алгоритм определения пускового момента (рис. 4). После установления минимальной частоты напряжения питания $f = 1$ (Гц) и максимального

пускового момента $M_{n.max}$ (2) из системы (1) получают решение для угла поворота $\theta(t)$ ШД. После чего определяются такие участки зависимости, первая производная которых является отрицательной, то есть направление вращения вала противоположно заданному.

Путем сравнения длительности найденных участков t_n с полупериодом напряжения питания $T_U/2$, устанавливается достаточно ли пускового момента ШД для преодоления нагрузки. В случае, если его недостаточно и соответственно выполняется неравенство (3), момент нагрузки M_n уменьшается на предварительно установленный шаг, а процесс расчета переходного процесса угла поворота повторяется. Процесс длится к тому моменту, пока (3) не будет нарушена, и ШД сможет запуститься без потери шагов, а его пусковой момент при данной частоте будет превышать момент нагрузки. Тогда предыдущее значение момента и будет максимальным пусковым моментом на данной частоте.

После запоминания текущих значений частоты и момента происходит увеличение частоты на предварительно заданный шаг и проводится расчет угла поворота при данной частоте и нагрузке. Процесс расчета повторяется, пока текущее значение момента нагрузки не будет близким к нулю. После чего, по сохраненным значениям строится пусковая характеристика.

В связи со сложными циклическими расчетами системы нелинейных дифференциальных уравнений, использования ППП MathCad для реализации разработанного алгоритма в полном объеме является невозможным. Потому разработчики данного ППП предлагают MathCad Automation Interface (MAI), что обеспечивает использование возможностей MathCad для динамических расчетов и обработки данных с соответствующей настройкой с помощью внешних программных средств [6].

Используя современную технологию .NET Framework 2.0 [7, 8], разработана компьютерная программа на основе приведенного алгоритма (рис. 4), который осуществляет моделирование пусковой характеристики для ШД с заданными параметрами или типом (рис. 6).



Рис. 6. Результаты моделирования пусковой характеристики ШД M35SP-6

Как видно из рис. 6 полученная зависимость пускового момента от частоты напряжения питания ШД воспроизводит представленную на рис. 3 теоретическую пусковую характеристику, учитывая при этом «провалы» низкочастотного резонанса. Это позволяет скорректировать измерительный процесс при контроле пускового момента. Также, используя пусковую характеристику, важно определить частоту приемистости ШД, которая является максимальной частотой напряжения питания, при котором двигатель способен запуститься без потери шагов [1, 2].

Рассмотренный подход моделирования пусковых характеристик позволяет не только осуществить математическое описание данных зависимостей, но и воспроизвести сам процесс измерения пускового момента. Этот факт важен, прежде всего, в методологическом

аспекте, поскольку позволяет представлять разработанный подход математического моделирования в виде метода измерения, суть которого заключается в следующем.

Контроль пусковых характеристик ШД основан на дискретном измерении его момента в пусковом диапазоне частоты напряжения питания при пошаговом уменьшении нагрузки, начиная с максимальной ($M_{n, max}$) к тому моменту, когда двигатель сможет запуститься. Этот момент времени определяется за критерием выхода ШД из синхронизма (3), путем сравнения времени вращения вала ШД в направлении, которое противоположно заданному, с полупериодом напряжения питания. Обработка полученных значений пускового момента для всех частот напряжения питания, в виде пусковой характеристики, направленная на определение частоты приемистости и установление типа качества ШД. Таким образом, имеем метод ускоренного контроля пусковых характеристик ШД, что позволяет повысить быстродействие измерения путем полной автоматизации процессов настройки и управления системы измерительного контроля и обработки данных.

Выводы

В данной работе разработан новый метод ускоренного контроля пусковых характеристик шаговых двигателей, что заключается в автоматизированном дискретном измерении момента в пусковом диапазоне частоты напряжения питания, с последующей обработкой и нормированием. В первую очередь, данный метод позволяет повысить быстродействие измерения. Также, за счет автоматизации повышается достоверность контроля пускового момента ШД путем исключения человеческого фактора.

В результате анализа существующих методов и средств измерения пускового момента установлено, что одной из основных проблем есть определение момента выхода ШД из синхронизма. Для решения данной проблемы предложен критерий, который основан на сравнении времени вращения вала ШД в направлении, которое противоположно заданному, с полупериодом напряжения питания.

Для разработки метода ускоренного контроля предложен способ математического моделирования пусковых характеристик ШД, что позволяет воспроизвести процесс измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления / Т. Кенио; пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 200 с.
2. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / [Ивоботенко Б. А., Рубцов В. П., Садовский Л. А. и др.]; под общ. ред. М. Г. Чиликина. - М.: Энергия, 1971. - 624 с.
3. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: [навчальний посібник] / [С. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк] - Вінниця: ВДТУ, 2001. - 219 с.
4. Кухарчук В. В. Математичні моделі крокового двигуна як об'єкта контролю / В. В. Кухарчук, В. В. Усов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Частина 1. - 2006. - №3. - С. 106 - 109.
5. Hughes A. Start/stopping rates of stepping motors: Improvement and prediction / A. Hughes, P. J. Lawrenson, P. P. Acarnley // Proc. International conference on stepping motors and systems. - 1976. - № 2. - PP. 150-157.
6. Дьяконов В. П. MathCAD 7 в математике, в физике и в Internet. / В. П. Дьяконов, И. В. Абраменкова. - М.: Нолидж. - 1998. - 352 с.
7. Нортроп Т. Основы разработки приложений на платформе Microsoft .NET Framework: [Учебный курс Microsoft] / Т. Нортроп, Ш. Уилдермьюс, Б. Райан; пер. с англ. - М.: Русская Редакция, 2007. - 864с.
8. Стэкер М. А. Разработка клиентских Windows-приложений на платформе Microsoft .NET Framework: [Учебный курс Microsoft] / М. А. Стэкер, Т. Нортроп, С. Дж. Стэйн; пер. с англ. - М.: Русская Редакция, 2008. - 624с.

Усов Виктор Васильевич – аспирант кафедры теоретической электротехники и электрических измерений, тел.: (0432) 598444, victor386@rambler.ru
Винницкого национального технического университета.