

о пространственном распределении воды по емкостям, давлению в системе подводящих труб и расходе воды поступает на компьютер 12 и обрабатывается.

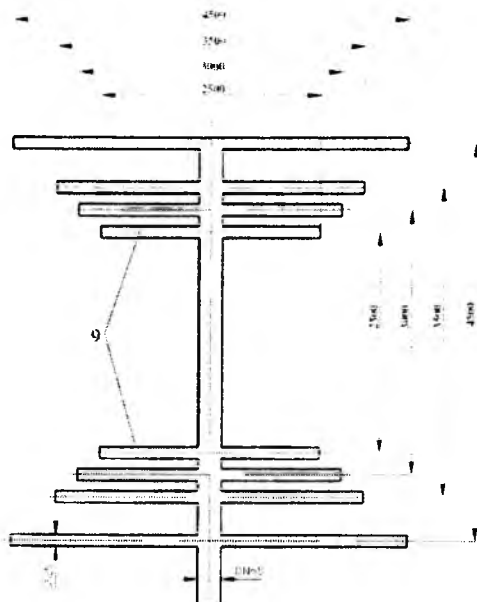


Рисунок 2 – Горизонтальная проекция системы труб для подвода воды к оросителям

Созданная установка позволяет проводить испытания различных типов оросителей в автоматическом режиме. Результаты испытания оросителей представляются в виде карты орошения, что позволяет оценить не только средние, но и распределение локальных значений интенсивности и равномерности орошения очага возгорания испытуемыми оросителями.

Создание оборудования для испытания оросителей согласно требованиям, предъявляемым европейскими нормами пожарной безопасности, обусловило существенную переработку ныне действующего СТБ 11.16.06-2011. Благодаря проведенной модернизации испытательной и нормативной базы по сертификации оросителей ожидается повышения эффективности проектируемых УП и расширение применяемых в Республике Беларусь моделей оросителей для защиты от пожара сооружений различного назначения.

1. ТКП 45-2.02-190-2010 Пожарная автоматика зданий и сооружений. Строительные нормы проектирования.
2. СТБ 11.16.06-2011/ГОСТ Р 51043-2002 Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Оросители. Общие технические требования. Методы испытания
3. ГОСТ Р 51043-2002 Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Оросители. Общие технические требования. Методы испытания
4. EN 12259-1:1999 Стационарные системы пожаротушения. Компоненты для спринклерных и водооросительных систем. Спринклера
5. ISO/FDIS 6182 Пожарная безопасность – Автоматические спринклерные системы. Часть 1: Требования и методы испытаний для спринклеров.
6. Пахомов, В.П. Сравнительный анализ технических характеристик спринклерных оросителей / В.П. Пахомов // Ассоциация спринклерной противопожарной индустрии, <http://www.firesprinkler.ru>

УДК 621.316.718.5:621.313.13-133.32

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ В РЕЖИМЕ РАЗГОНА

Воробей Р.И., Гусев О.К., Дубаневич А.В., Жарин А.Л., Свистун А.И.,  
Тявловский А.К., Тявловский К.Л.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

При высоких требованиях к точности перемещения, характерных для систем позиционирования в приборостроении, в качестве силового элемента привода обычно используются шаговые двигатели (ШД). Для повышения быстродействия привода разгон ШД желательно осуществлять с максимальным ускорением, исключая его пробуксовку. Поскольку скорость вращения ротора ШД определяется частотой смены фаз его обмоток, такой режим требует непрерывного расчета задержек смены фаз в реальном масштабе времени.

При программном управлении для формирования задержек обычно используется программный таймер, работающий на фиксированной тактовой частоте  $f$ . Формируемая таймером задержка  $\Delta t$  рассчитывается по формуле

$$\Delta t = \frac{c}{f}, \quad (1)$$

где  $c$  – программная установка отсчетов таймера.

Угловая скорость вращения ротора при этом будет равна

$$\omega = \frac{\alpha}{\Delta t} = \alpha \frac{f}{c}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – шаг двигателя, выраженный в радианах.

Величину углового ускорения ротора шагового двигателя  $\omega'$  можно определить, продифференцировав выражение (2) по параметру  $c$ :

$$\omega' = \frac{2\alpha f^2(c_n - c_{n+1})}{c_n c_{n+1}(c_n + c_{n+1})}, \quad (3)$$

где  $c_n$  и  $c_{n+1}$  – установки отсчетов программного таймера для двух последовательных шагов.

Угол поворота ротора определяется интегрированием угловой скорости, что при равноускоренном движении дает выражение

$$\theta = \frac{\omega' t^2}{2} = n\alpha, \quad (4)$$

где  $n$  – номер шага двигателя.

Из (1)-(4) можно определить закон изменения программных установок таймера для обеспечения равноускоренного движения:

$$c_n = f \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega'}} (\sqrt{n+1} - \sqrt{n}). \quad (5)$$

Как видно из (5), начальная установка таймера при  $n = 0$  должна составлять  $c_0 = f \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega'}}$ . Тогда расчет последующих установок можно вести на основании величины

$$c_n = c_0(\sqrt{n+1} - \sqrt{n}). \quad (6)$$

Данное выражение предусматривает двукратное вычисление квадратного корня из числа, однако существующие микроконтроллеры не обеспечивают такие вычисления в реальном масштабе времени. Для ускорения вычислений могут использоваться два подхода:

1. Использование табличных значений множителя  $(\sqrt{n+1} - \sqrt{n})$ , предварительно рассчитанных для каждого шага  $n$ . Таблица значений заносится в память контроллера при его программировании. Такой способ обеспечивает наибольшее быстродействие, однако требует большого объема памяти и потому пригоден не для всех контроллеров.

2. Использование упрощенного аппроксимирующего выражения, получаемого при разложении степенной функции в выражении (6) в ряд Тэйлора.

Для вывода аппроксимирующего выражения рассчитаем относительное приращение установки отсчетов таймера на  $n$ -м шаге:

$$\delta c = \frac{c_n}{c_{n-1}} = \frac{\sqrt{n+1} - \sqrt{n}}{\sqrt{n} - \sqrt{n-1}} = \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{n}} - 1}{1 - \sqrt{1 - \frac{1}{n}}}. \quad (7)$$

Раскладывая выражения под корнем в ряд Тэйлора, получаем

$$\delta c = \frac{\frac{1}{2n} - \frac{1}{8n^2} + O\left(\frac{1}{n^3}\right)}{\frac{1}{2n} + \frac{1}{8n^2} - O\left(\frac{1}{n^3}\right)} \approx \frac{4n-1}{4n+1}, \quad (8)$$

откуда

$$c_n = \delta c \cdot c_{n-1} = c_{n-1} \cdot \frac{2c_{n-1}}{4n+1}. \quad (9)$$

Таким образом, аппроксимирующее выражение позволяет заменить две операции вычисления корня одной операцией деления, что на порядок повышает скорость вычислений. При высоком быстродействии микроконтроллера появляется возможность одновременного управления несколькими шаговыми двигателями, например, в случае управления трехкоординатной системой перемещения в трехмерном пространстве.

Использование аппроксимирующего выражения (9), очевидно, привносит дополнительную систематическую погрешность в закон управления ШД. Величину этой погрешности можно определить, рассчитав разность значений программных установок таймера, получаемых согласно выражениям (5) и (9). По результатам такого математического моделирования были получены следующие значения погрешности:

- для 1-го шага – плюс 44,9 %;
- для 2-го шага – плюс 1,36 %;
- для 3-го шага – плюс 0,37 %;
- для 4-го и последующих – менее 0,1 %.

Из полученных результатов следует, что уже на втором шаге погрешность расчета по формуле (11) оказывается сопоставимой с допуском на параметры шагового двигателя, и, таким образом, ей можно пренебречь. Погрешность первого шага, напротив, весьма значительна и не может быть исключена из рассмотрения. В связи с этим было выполнено дополнительное моделирование, которое проводилось в два этапа:

1. Для расчета величины  $c_1$  было рассчитано точное значение множителя  $(\sqrt{n+1} - \sqrt{n})$ , что дало формулу

$$c_1 = 0,414c_0. \quad (10)$$

Для второго и последующих шагов ШД установки таймера рассчитывались согласно выражению (9). В этом случае график ускорения был близок к горизонтальной прямой линии, максимальное отклонение от которой составило 1,36 %. Таким образом, при реализации данного режима постоянство углового ускорения при разгоне ротора ШД поддерживается с точностью до второго знака после запятой.

2. На втором этапе моделирования выражение (9) использовалось для расчета всех установок таймера. Результаты моделирования в среде MathCAD были представлены в виде графика, приведенного на рисунке 1. Ускорение на первом шаге при этом оказалось на 57 % меньше, чем в предыдущем случае, однако, в отличие от полученных на первом этапе результатов, первая производная от ускорения ротора ШД оказалась конечной в течение всего времени разгона, что свидетельствует о безударном характере движения. При использовании выражения (10) на первом шаге, т.е. в момент начала раз-

гона ротора ШД, имеет место стремящийся к бесконечности максимум первой производной от ускорения, что характерно для удара.

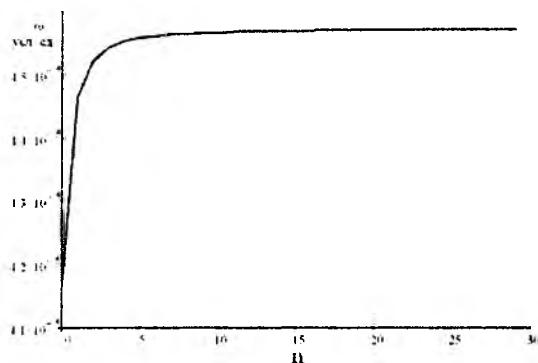


Рисунок 1 – Изменение ускорения ротора ШД (в условных единицах) при использовании аппроксимирующего выражения

Проинтегрировав полученные на первом и втором этапах моделирования зависимости углового ускорения от номера шага, можно получить графики изменения угловой скорости ротора ШД в процессе разгона. Результаты такого интегрирования приведены на рисунке 2. Пунктирной линией показан график изменения угловой скорости при использовании точного выражения (10) для первого шага и аппроксимирующего (9) для остальных, сплошной линией – при использовании только аппроксимирующего выражения (9). Видно, что в первом случае на первых шагах достигаются более высокие угло-

вые скорости, т.е. разгон идет быстрее, однако затем графики сближаются и после 25-го шага оба закона управления обеспечивают одинаковые значения угловой скорости.

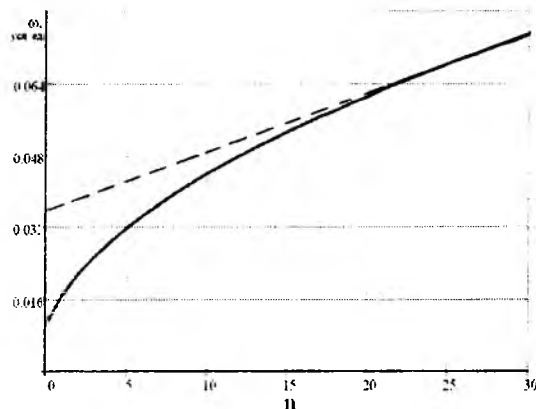


Рисунок 2 – Изменение скорости вращения ротора ШД (в условных единицах) при использовании аппроксимирующего (сплошная линия) и уточненного (пунктирная линия) выражений.

Таким образом, использование уточненного выражения (10) вместо приближенного (9) позволяет сократить время достижения требуемой угловой скорости только при коротком, менее 25 шагов, разгоне ШД, при этом в начале движения будет иметь место удар. Во всех остальных случаях предпочтительным, в том числе и по времени разгона, является использование только аппроксимирующего выражения (9).

УДК 621.382

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ КРП

Воробей Р.И., Гусев О.К., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Жарин А.Л., Дубаневич А.В.

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Республика Беларусь*

Одним из способов контроля качества прецизионных поверхностей, в том числе композитных материалов и микронизированных структур, поверхностей изделий под защитными диэлектрическими покрытиями, является получение и анализ пространственного распределения электрического потенциала. Однако практическое применение этого метода связано с рядом трудностей. Любые локальные неоднородности и изменения в материале проявляются в виде соответствующих изменений распределения электрического потенциала поверхности. Относительная легкость изменения величины поверхностного потенциала и проявление в этих изменениях практически любых физико-химических процессов на поверхности делает необходимым учет при анализе результатов измерений предыстории ("биографии") исследуемых объектов контроля.

Поверхность объектов контроля всегда пространственно неоднородна, что неизбежно проявляется и в неоднородном распределении электрического потенциала поверхности. Электрическое зарядное покрытие поверхности изделия с защитными диэлектрическими покрытиями приводит к приобретению поверхностью значительного электрического потенциала, что не позволяет использовать измерительный преобразователь с обратной связью и регистрацией компенсирующего напряжения.

Применение метода зонда Кельвина позволяет обнаруживать и измерять параметры пространственного распределения электрического потенциала поверхности объекта контроля, связанные с неоднородностью распределения структурных образований, обнаружения областей с механическими напряжениями, контроля компо-