

## Распределенное управление группой шаговых двигателей на основе многоканальных приёмопередатчиков

*В.И. Капля, Д.И. Казаков, А.П. Коротков*

*Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета*

**Аннотация:** В статье рассмотрено решение задачи распределенного управления группой шаговых двигателей на основе многоканальных приемопередатчиков. Проведен анализ литературных источников, посвященных разработке беспроводных систем управления шаговыми двигателями. Рассмотрена целесообразность и возможность распределенного управления шаговыми двигателями звеньев манипулятора с использованием многоканальных приемопередатчиков. Предполагается необходимость обеспечения двустороннего обмена информацией между модулем с шаговым двигателем и центральной системой управления. Получены расчетные соотношения для длительности цикла передачи полного пакета управляющей информации с учетом величин длительности пауз на переключение приём-передача, длительности преамбулы и длительности передачи адреса, полезной информации и контрольной суммы пакета. Обоснована возможность увеличения максимальной частоты управляющих импульсов, передаваемых по информационному каналу, при передаче последовательности управляющих пакетов вместо одиночных пакетов. Определена структура пакета для управления электронным драйвером шагового двигателя, включающая указатель направления вращения, длительность импульсов и степень дробности шага. Приведён пример расчета, на основе полученных соотношений, величины максимальной скорости вращения вала шагового двигателя для конкретных моделей двигателя и приемопередатчика в случае шестиканальной системы управления.

**Ключевые слова:** распределённое управление, группа шаговых двигателей, управляющий пакет, частота управляющих импульсов.

### Введение

Распределённое управление на основе беспроводных технологий служит средством повышения эксплуатационных свойств для средств производства, снижая количество необходимых механических и проводных соединений. Управление группой шаговых двигателей (ШД) подразумевает непрерывную передачу управляющих импульсов, задающих направление и скорость пошагового вращения вала таких двигателей. Известны примеры [1] управления ШД по сети Интернет, радиочастотным каналам [2,3] и через инфракрасный канал связи [4].

В качестве примера рассмотрим структуру управления звеньями манипулятора путем применения многоканальных приёмопередатчиков. Традиционное проводное управление ШД звеньев манипулятора [5,6] требует подведения к каждому электронному драйверу ШД группы проводов, по которым должна поступать информация о направлении и степени дробления шагов. Поскольку звенья манипулятора активно выполняют относительные перемещения, то возникает проблема осуществления электрических соединений в местах механического сочленения звеньев манипулятора. Использование вращающихся и скользящих электрических контактов проблематично, так как им присуще возникновение электрических помех, что критично для управления ШД. Применение подвешенных кабельных соединений в местах соединения звеньев снижает уровень безопасности эксплуатации манипулятора и снижает эстетичность их внешнего вида.

### **Постановка задачи**

Рассматривается задача создания распределённой системы управления ШД звеньев манипулятора, учитывающая реальное положение всех звеньев манипулятора. Источниками информации о реальном положении всех звеньев манипулятора должны являться датчики положения, которыми оснащены звенья. Информация от датчиков положения так же формируется и транслируется контроллерами и приёмопередатчиками звеньев в виде информационных пакетов состояния, как показано на рис.1.

Каждое звено имеет независимую локальную систему управления, которая должна работать в рамках обеспечения синхронных перемещений звеньев. Система управления звена включает приёмопередатчик, микроконтроллер и электронный драйвер ШД. Синхронизм распределенной системы управления группой ШД должен обеспечиваться центральной системой управления, которая получает информацию от системы управления

---

манипулятора (СУМ) и распределяет её между локальными системами управления звеньев.

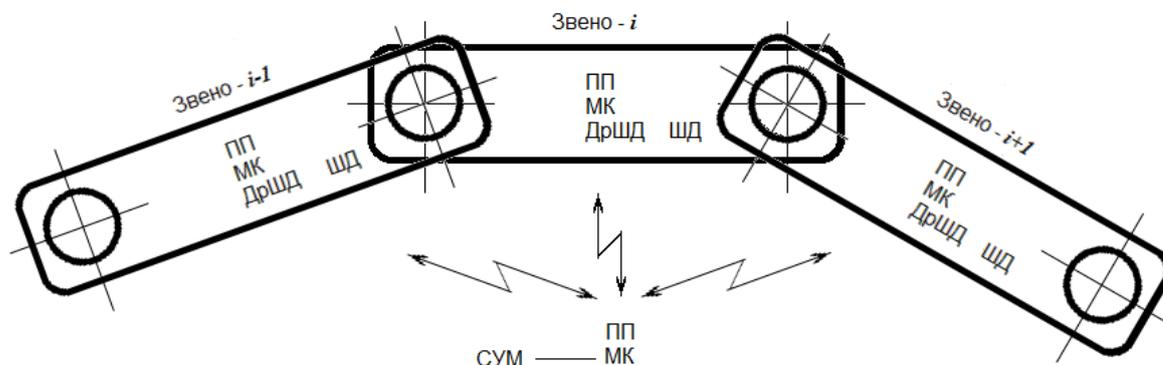


Рис.1. Управление звеньями манипулятора системой многоканальных приемопередатчиков

Контроллер звена может получить фрагмент или всю программу движения звена в рамках выполняемой задачи, которая может быть передана ему по радиоканалу до начала выполнения очередной операции.

### Расчетные соотношения

Возможность обеспечения работы всех ШД манипулятора на максимальной скорости зависит от пропускной способности канала информационного обмена и объема управляющей информации [7,8].

Длительность  $\tau_I$  передачи одного полного пакета информации складывается из длительности передачи преамбулы  $\tau_{pa}$ , адреса приемника  $\tau_{adr}$ , полезной информации  $\tau_{inf}$ , контрольной суммы  $\tau_{cs}$ .

$$\tau_I = \tau_{pa} + \tau_{adr} + \tau_{inf} + \tau_{cs}$$

Если известны объем пакета в байтах  $V_P$  и скорость передачи информации приемопередатчиками  $R_I$  бит в секунду, то параметр  $\tau_I$  можно вычислить по формуле:

$$\tau_I = 8 \cdot V_P / R_I.$$

При обмене информацией между центральной системой управления и одним из звеньев параметр манипулятора имеют место следующие временные длительности и паузы:  $\tau_{PP}$  – пауза между пакетами,  $\tau_{RT}$  – пауза на переключение режимов прием-передача,  $\tau_{TR}$  – пауза на переключение режимов передача-прием,  $\tau_A$  – пауза на смену адреса. Длительность цикла передачи информации из  $n_p$  пакетов вычисляется по формуле:

$$\tau_T = \tau_A + \tau_{RT} + n_p \cdot (\tau_I + \tau_{PP}) - \tau_{PP}.$$

Длительность  $\tau_{CZ}$  цикла обмена информацией центральной системы управления с системой управления одного звена для передачи  $n_C$  пакетов управления и приёма  $n_S$  пакетов состояния:

$$\tau_{CZ} = \tau_A + \tau_{RT} + \tau_{TR} + (n_C + n_S) \cdot (\tau_I + \tau_{PP}) - 2\tau_{PP}.$$

Полученное соотношение позволяет оценить величину времени, необходимого для выполнения цикла обмена информацией со всеми звеньями манипулятора. Если использовать только один приёмопередатчик центральной системы управления, то при последовательном управлении звеньями, длительность цикла пропорциональна количеству шаговых двигателей  $N_{SM}$ .

Последовательная передача нескольких пакетов в общем цикле обмена информацией требует меньше времени, чем передача их поодиночке в разных циклах обмена, так как нет необходимости чередующихся переключений на приём или передачу.

Пропускная способность информационных каналов зависит от объема управляющей информации, обеспечивающей один полный шаг двигателя. Сигналы управления, поступающие на электронный драйвер ШД, должны включать следующие параметры (в скобках указан типичный информационный объём параметра): направление шага (1 бит), длительность шага (4 байта), дробность шага (7 бит).

---

Число шагов  $N_{PS}$ , информацию для выполнения которых можно разместить в одном пакете, можно определить следующим образом:

$$N_{PS} = \text{floor}\left(\frac{V_P}{V_S}\right),$$

где  $V_P$  – полезный объем в байтах одного полного пакета информации (например, 32 байта),  $V_S$  – объем в байтах информации для выполнения одного шага (например, 6 байта),  $\text{floor}(\cdot)$  – функция округления аргумента до целого значения в меньшую сторону.

Угловая скорость вращения вала ШД определяется величиной углового шага  $\alpha_{step}$  и частотой импульсов  $f_{pulse}$ , поступающих на обмотки двигателя [9,10]. Величина углового шага  $\alpha_{step}$  обычно задается в угловых градусах, а величина частоты импульсов  $f_{pulse}$  в *pps* (*pulse per second*). Выполнение одного углового шага осуществляется в процессе одного периода управляющих импульсов. Число оборотов вала ШД в течение секунды определяется по формуле:

$$n_c = \frac{\alpha_{step} \cdot f_{pulse}}{360^\circ}.$$

Реализация одного полного оборота двигателя при угловом шаге  $\alpha_{step}$  требует передачи  $N_P$  пакетов:

$$N_P = \frac{360^\circ}{\alpha_{step} N_{PS}}.$$

Максимальная частота управляющих импульсов  $f_{pulseTR}$  для заданных параметров информационно-управляющей системы, которую может обеспечить приёмопередатчики, вычисляется по следующей формуле:

$$f_{pulseTR} = \frac{N_{PS} n_c}{N_{SM} \tau_{CZ}} = \frac{N_{PS} n_c}{N_{SM} (\tau_A + \tau_{RT} + \tau_{TR} + (n_C + n_S)(\tau_I + \tau_{PP}) - 2\tau_{PP})}.$$

## Пример расчета

Рассмотрим параметры беспроводного управления группой из 6 ШД 17HS4401. ШД данной модели имеют следующие основные скоростные параметры: максимальная пусковая частота управляющих импульсов равна 1000 rps (импульсов в секунду), максимальная частота управляющих импульсов – 1500 rps, угловой шаг –  $1.8^\circ$ . Полный шаг при максимальной угловой скорости такой двигатель совершает за 670 мкс, полный оборот совершается за 133 мс, а максимальная частота вращения составляет 7.5 оборотов в секунду.

Электронный драйвер ШД A4988 рассчитан на работу с управляющими импульсами длительностью не менее 30 мкс.

Приёмопередатчик NRF24L01 имеет максимальную скорость передачи информации  $R_I=2$  Мбит/с. Формат пакета: преамбула имеет длину 1 байт, адрес – 5 байт, полезная информация – 32 байта, контрольная сумма – 2 байта. Объем пакета  $V_P=40$  байт. Учитывая, что параметры одного шага имеют суммарный объем 5 байт, получаем, что один пакет содержит информацию для выполнения  $N_{PS} = 6$  шагов ШД. В дальнейшем считается, что  $\tau_A \approx 0$  и  $\tau_{PP} \approx 0$ . Длительность передачи одного полного пакета информации равна:

$$\tau_I = 8 \cdot V_P / R_I = 160(\text{мкс}).$$

Если пакеты управления и состояния звена имеют одинаковые размеры, то длительность цикла обмена информацией с одним звеном составит:

$$\tau_1 = \tau_{RT} + 2\tau_I + \tau_{TR} = 130 + 2 \cdot 160 + 130 = 260 + 320 = 580(\text{мкс}).$$

Длительность одного полного цикла обмена информацией с 6 звеньями  $N_{SM} = 6$  составит 3480 мкс. Длительность передачи информации для выполнения одного шага двигателя, ввиду равенства числа звеньев и числа шагов, содержащихся в одном пакете, составляет: 580 мкс. Поскольку

минимальная длительность шага ШД равна 670 мкс, и она больше длительности передачи информации для выполнения этого шага (670 мкс > 580 мкс), то можно сделать вывод о достаточности скоростных качеств выбранного приёмопередатчика.

Максимальная частота управляющих импульсов  $f_{pulseTR}$  для вариантов использования одного или двух управляющих пакетов соответственно равна:

$$f_{pulseTR}^1 = \frac{1}{\tau_A + \tau_{RT} + \tau_{TR} + 2 \cdot \tau_I + \tau_{PP}} = 1724 \text{ pps},$$

$$f_{pulseTR}^2 = \frac{2}{\tau_A + \tau_{RT} + \tau_{TR} + 3 \cdot \tau_I + 2\tau_{PP}} = 2702 \text{ pps}.$$

Полученные величины подтверждают возможность увеличения пропускной способности информационного потока путём увеличения управляющих пакетов, передаваемых в одном цикле информационного обмена. Однако, такой способ увеличивает время реакции системы управления на возможные возмущения в работе ШД.

### Заключение

Предложенные в статье структура и алгоритмы работы системы распределенного управления ШД с использованием многоканальных приёмопередатчиков позволяют упростить конструкцию манипулятора и повысить помехозащищённость каналов управления. Полученные аналитические соотношения позволяют оценить пропускную способность информационных каналов системы и выбрать режим их работы.

### Литература

1. Irmak E, Colak I, Kabalcı E, Kose A. Implementation of an Interactive Remote Laboratory Platform for Stepper Motor Experiments // 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC, 2012. pp.51–55.

2. Shi S., Lu T., Zhang H., Xu L., Gulliver T. A. A design of active RFID tags based on NRF24l01 // 10th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP), 2013. pp. 210–213.
  3. Velagic J., Osmic N., Silajdzic S., Terzimehic T., Vajnberger V. Remote Control of Stepper Motor via Web Server // Conference on Control and Fault Tolerant Systems Nice, France, October 6-8, 2010. pp.910–915.
  4. Li X., Li H.. Design of Servo control system for Stepper Motor Based on MCU and Infrared Remote Control. Advanced Materials Research Vols. 765-767, 2013. pp. 1808-1812.
  5. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ, 2004. 480 с.
  6. Kelly, R. Control of robot manipulators in joint space. Springer-Verlag London Limited, 2005. 429 p.
  7. Зубков П.С., Кулаев Н.А., Артамонов В.Ю., Дубов Н.В. Моделирование алгоритма управления двигателем для микроконтроллера STM32 с использованием метода модельно-ориентированного проектирования // Инженерный вестник Дона, 2020, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2020/6333](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2020/6333).
  8. Капля В.И., Пан А.Г., Дягилева Т.В. Алгоритм вычисления минимального времени одного такта работы шагового двигателя // Инженерный вестник Дона, 2015, №2-1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2943](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2943).
  9. Acarnley P.P. Stepping motors a guide to theory and practice. The Institution of Engineering and Technology, 2007. 172 p.
  10. Hughes A., Drury B. Electric motors and drives. Fundamentals, types, and applications. Elsevier Ltd., 2013. 439 p.
-

## References

1. Irmak E, Colak I, Kabalcı E, Kose A. 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC. 2012, pp.51–55.
2. Shi S., Lu T., Zhang H., Xu L., Gulliver T. A. 10th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP). 2013, pp. 210–213.
3. Velagic J., Osmic N., Silajdzic S., Terzimehic T., Vajnberger V. Conference on Control and Fault Tolerant Systems Nice, France, October 6-8, 2010, pp.910–915.
4. Li X., Li H.. Design of Servo control system for Stepper Motor Based on MCU and Infrared Remote Control. Advanced Materials Research Vols. 765-767. 2013. pp. 1808–1812.
5. Zenkevich S.L., Jushhenko A.S. Osnovy upravlenija manipuljacionnymi robotami: Uchebnik dlja vuzov. [Fundamentals of the management of manipulation robots: a textbook for universities]. M.: Izd-vo MGTU, 2004. 480 p.
6. Kelly, R. Control of robot manipulators in joint space. Springer-Verlag London Limited, 2005. 429 p.
7. Zubkov P.S., Kulaev N.A., Artamonov V.Ju., Dubov N.V. Inzenernyj vestnik Dona, 2020, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2020/6333](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2020/6333).
8. Kaplja V.I., Pan A.G., Djagileva T.V. Inzenernyj vestnik Dona, 2015, №2-1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2943](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2943).
9. Acarnley P.P. Stepping motors a guide to theory and practice. The Institution of Engineering and Technology, 2007. 172 p.
10. Hughes A., Drury B. Electric motors and drives. Fundamentals, types, and applications. Elsevier Ltd., 2013. 439 p.