

УДК 621.3.076.7

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_65

## АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ КОНТРОЛЛЕРА ДВИЖЕНИЯ

**В.М. Иванов**

ORCID: 0000-0002-0332-5738 e-mail: v.ivanov@ulstu.ru

Ульяновский государственный технический университет

*Ульяновск, Россия*

Одно из актуальных направлений развития средств числового программного управления связано с разработкой распределенных систем управления. В статье рассматривается алгоритмическое обеспечение контроллера для реализации задач траекторного управления шаговым электроприводом. В качестве базового алгоритма принят интерполяционный алгоритм, реализованный по методу оценочной функции. При этом предполагается, что основное взаимодействие центральной ЭВМ и контроллера движения осуществляется путем загрузки массива точек траектории. Особенности алгоритма связаны с отслеживанием координат в процессе отработки кадров. В отличие от известных аналогов, в рассматриваемых алгоритмах нет явного выделения ведущей координаты. Это обеспечивается за счет равноценных ветвей решений и анализа приращений координат. Рассмотренные принципы отработки траектории позволяют работать как в правосторонней, так и в полной системе декартовых координат.

**Ключевые слова:** бесколлекторный двигатель постоянного тока, интерполяция, контроллер движения, метод оценочной функции, шаговый двигатель.

**Для цитирования:** Иванов В.М. Алгоритмы управления шаговым электроприводом для контроллера движения // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 65-77. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_65

## STEPPER MOTOR CONTROL ALGORITHMS FOR MOTION CONTROLLER

**V.M. Ivanov**

ORCID: 0000-0002-0332-5738 e-mail: v.ivanov@ulstu.ru

Ulyanovsk State Technical University

*Ulyanovsk, Russia*

**Abstract.** One of the actual directions of the development of numerical control software is associated with the development of distributed control systems. The article considers the algorithmic support of the controller for the implementation of the tasks of

trajectory control of a stepper electric drive. The interpolation algorithm implemented by the method of the evaluation function is adopted as the basic algorithm. It is assumed that the main interaction of the central computer and the motion controller is carried out by loading an array of trajectory points. The algorithm features are related to tracking coordinates during frame processing. Unlike the known algorithms, there is no explicit allocation of the leading coordinate in the algorithms under consideration. This is ensured by equivalent branches of solutions and analysis of coordinate increments. The considered principles of working out the trajectory allow you to work both in the right-hand and in the full Cartesian coordinate system.

**Keywords:** brushless DC electric motor, evaluation function method, interpolation, motion controller, stepper motor.

**For citation:** V.M. Ivanov, “Stepper motor control algorithms for motion controller”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 65-77, 2023.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_65

## I. Введение

В настоящее время основу современных средств числового программного управления составляют промышленные компьютеры и контроллеры. Для расширения функциональных возможностей промышленных компьютеров ряд фирм в состав комплектующих блоков вводит интеллектуальные модули, за счет которых решаются задачи интерполяции и управления сервоприводами и шаговыми электроприводами. Преимущества распределенных систем числового программного управления, прежде всего, связаны с решением проблем реального времени, которые возникают при многокоординатной обработке. Наличие развитого интерфейса существенно расширяет возможности при обработке входной информации и формировании сигналов управления. Для решения данных задач используются микроконтроллеры (МК) общепромышленных серий, имеющих по сравнению с центральным процессором сравнительно низкое быстродействие. Можно отметить, что основная стоимость контроллеров движения определяется затратами на разработку алгоритмического и программного обеспечения.

Отсутствие или недостаточная проработанность алгоритмов является сдерживающим фактором при разработке, так как на системном уровне с помощью них определяется взаимодействие специалистов различного профиля.

Целью данной работы является разработка унифицированных алгоритмов, учитывающих общность систем команд микроконтроллеров, при реализации задач траекторного управления шаговым электроприводом.

## II. Линейная интерполяция по методу оценочной функции

Основными типами интерполяции, используемыми в станочных системах числового программного управления (ЧПУ), является линейная и круговая интерполяция [1, 2]. К числу наиболее простых и распространенных относится интерполяционный алгоритм, реализованный по методу оценочной функции [3, 4]. Методология данного алгоритма предполагает формирование элементарных приращений, что определяет использование, в качестве основного исполнительного, шагового двигателя (ШД).

Данный метод первоначально использовался при аппаратной реализации алгоритмов. В [5, 6] произведено обоснование метода и рассмотрены варианты реализации для формирования произвольных функций. Однако вопросы детализации алгоритмов для контроллеров движения рассмотрены недостаточно полно.

Интерполяция по данному алгоритму обычно ведется в абстрактных координатах  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , в отличие от реальных координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . При этом интерполяционные расчеты ведутся в первом квадранте соответствующей плоскости, а преобразование координат производится на этапе интерпретации кадра.

Рассмотрим линейную интерполяцию по двум координатам (рис. 1), где показана ступенчатая отработка движения в функции  $F$ , учитывающей знак отклонения траектории от заданной прямой.

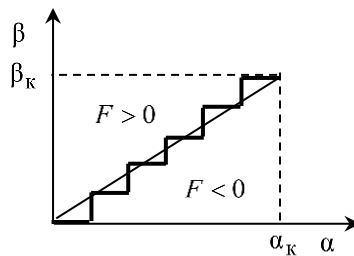


Рис. 1. Линейная интерполяция по методу оценочной функции

Fig. 1. Linear interpolation by the evaluation function method

Примем в качестве основного варианта определения координат ввод их значений относительно нулевой точки. Тогда расчетное уравнение прямой для участка траектории может быть записано следующим образом:

$$\beta = \frac{Y_i - Y_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \alpha = \frac{\Delta Y_i}{\Delta X_i} \alpha = \frac{\beta_k}{\alpha_k} \alpha, \quad (1)$$

где  $(X_{i-1}, Y_{i-1})$  и  $(X_i, Y_i)$  – начальная и конечная точки участка траектории;  $\Delta X_i, \Delta Y_i$  – приращения координат;  $i = 1, 2, 3 \dots n$  – номер участка;  $\alpha_k, \beta_k$  – конечные значения координат на участке траектории.

Приращения координат определяют участок обработки и в общем случае могут иметь произвольные значения. Для привязки интерполяционных расчетов к первому квадранту необходимо формировать модули  $|\Delta X_i|, |\Delta Y_i|$  приращений. При этом, чтобы отслеживать значения координат  $\alpha, \beta$  на плоскости, необходимо учитывать знаки  $\text{sgn}\Delta X, \text{sgn}\Delta Y$  приращений координат. Эти признаки также используются и для определения направления движения исполнительных приводов по соответствующей координате. Очевидным условием, связанным с отработкой движения и формированием признака его окончания, является также выбор ведущей координаты, которая определяется по наибольшему приращению в кадре.

В качестве оценочной функции в любой точке  $i$  траектории можно принять разность текущего и расчетного значений координаты

$$F_i(\alpha_i, \beta_i) = \beta_i - \frac{\beta_k}{\alpha_k} \alpha_i, \quad (2)$$

Учитывая, что при формировании закона управления движением имеет значение только знак оценочной функции, последнее выражение может быть представлено в виде:

$$F_i(\alpha_i, \beta_i) = \alpha_k \beta_i - \beta_k \alpha_i, \quad (3)$$

После выполнения шага по координате  $\alpha$ , следующее значение оценочной функции будет:

$$F_{i+1}(\alpha_i + 1, \beta_i) = \alpha_k \beta_i - \beta_k (\alpha_i + 1) = F_i(\alpha_i, \beta_i) - \beta_k, \quad (4)$$

Если выполняется шаг по координате  $\beta$ , то оценочная функция:

$$F_{i+1}(\alpha_i, \beta_i + 1) = \alpha_k (\beta_i + 1) - \beta_k \alpha_i = F_i(\alpha_i, \beta_i) + \alpha_k. \quad (5)$$

Управление движением по (4), (5) происходит по следующим правилам. Если в данный момент времени значение оценочной функции положительно  $F(\alpha, \beta) > 0$ , то делается шаг по координате  $\alpha$ , если отрицательно  $F(\alpha,$

$\beta) < 0$ , то выполняется шаг по координате  $\beta$ . Без ограничения общности рассмотренные положения для ведущей координаты  $\alpha$  могут быть использованы для ведущей координаты  $\beta$ .

### III. Алгоритмы управления

Обработка участка траектории должна осуществляться с заданной скоростью подачи  $v_3$ . Кроме того, необходимо обеспечить разгон и торможение с допустимым темпом изменения скорости. На диаграмме движения (рис. 2) можно выделить три основных участка: разгона ( $0 - \alpha_p$ ), движения с постоянной скоростью ( $\alpha_p - \alpha_t$ ), торможения ( $\alpha_p - \alpha_k$ ). Изменение скорости на участках разгона и торможения может иметь кусочно-линейный характер, учитывающий выборку люфтов в кинематических передачах, влияние сухого трения и уменьшение скорости для точного позиционирования [7].

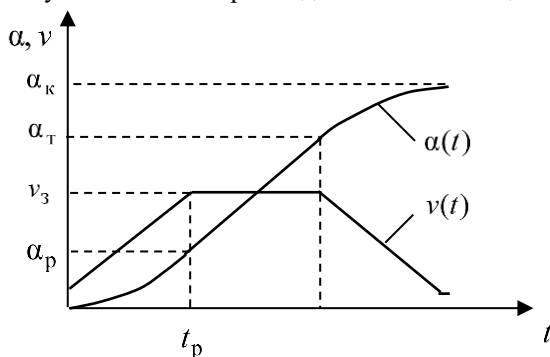


Рис. 2. Диаграмма линейного разгона и торможения

Fig. 2. Diagram of linear acceleration and deceleration

Специфические особенности метода оценочной функции связаны с тем, что скорость перемещения определяется частотой  $f$  выдачи элементарных приращений:

$$v = \frac{h}{T} = h \cdot f, \quad (6)$$

где  $h$  – цена единичного шага перемещения (дискретность);  $T$  – период прерываний от таймера.

С учетом рабочих и ускоренных перемещений, диапазон скоростей приводов подач значителен. Это определяют повышенные требования к диапазону изменения частоты прерываний от таймера. Примем в качестве основного закон, обеспечивающий равноускоренный пуск. Пусть начальная

частота равна  $f_0$ , тогда, задав допустимое приращение частоты (приемистость) на интервале  $T_0 = 1/f_0$ , получим:

$$f_1 = f_0 + \nabla f_0 = f_0 + kT_0, \quad (7)$$

где  $k = \frac{\nabla f_0}{T_0}$ .

Аналогично можно получить следующую частоту, используя итерационную формулу:

$$f_n = f_{n-1} + kT_{n-1}, \quad (8)$$

и определить коэффициент деления эталонной частоты  $f_{\text{эт}}$  таймера

$$N_n = \text{Ent} \frac{f_{\text{эт}}}{f_n}, \quad (9)$$

где  $\text{Ent}$  – целочисленное значение.

Рассчитанные значения коэффициентов деления записываются в виде таблицы. Выход на заданное значение скорости в этом случае определяется по пройденному пути, соответствующему количеству отработанных шагов. Конечное значение  $N_k$  указателя, по которому осуществляется выборка из таблицы коэффициентов и загрузка в таймер, определяется следующим образом: если  $X > 2 \cdot k$ , то  $N_k = k$ , иначе  $N_k = X / 2$ . Здесь  $k$  – число элементов таблицы. К недостаткам рассмотренного варианта формирования скорости можно отнести: необходимость пересчета табличных значений для изменения темпа приращения скорости.

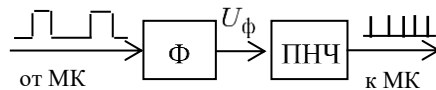


Рис. 3. Задатчик частоты интерполятора

Fig. 3. The interpolator frequency setter

Для МК с развитой периферией в качестве задатчика частоты интерполятора целесообразно использовать цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) совместно с преобразователем напряжения в частоту (ПНЧ). В качестве ЦАП можно использовать таймер в режиме сравнения, выход которого

подключен к простейшему  $R$ - $C$  фильтру  $\Phi$  (рис. 3). Таймер реализует функцию широтно-импульсного регулятора. Среднее значение напряжения на выходе фильтра при этом будет  $U_{\Phi} = U_0 \frac{N_i}{N_{\max}}$ , где  $U_0$  – напряжение пита-

ния;  $N_{\max} = 2^n$  – число состояний счетчика-таймера, зависящее от его разрядности;  $N_i = N_{i-1} + \Delta N$  – текущее значение кода развертки линейной зависимости на  $i$ -м интервале;  $\Delta N$  – приращение, определяющее темп изменения частоты ПНЧ. Для формирования участков разгона и торможения используется указатель  $K$  выхода на заданную частоту ПНЧ. При этом значение указателя  $K = K_m \cdot f_3 / f_m$ , где  $f_3, f_m$  – заданное и максимальное значение частоты отработки кадра;  $K_m = N_{\max} / \Delta N$  – число, соответствующее частоте  $f_m$  на выходе ПЧН.

Прерывания от таймера в этом случае должны иметь более высокий приоритет по отношению к прерываниям задатчика частоты интерполятора.

Главный алгоритм контроллера движения представлен на рис. 4. Обязательным этапом подготовки микроконтроллера к работе является инициализация его периферийных устройств [8]. На этапе инициализации определяется конфигурация контроллера для решения задач сопряжения с центральной микро-ЭВМ и драйверами силовых ключей коммутаторов шаговых двигателей.

Основная работа по подготовке управляющей программы осуществляется с помощью центральной микро-ЭВМ. После обработки и создания очереди кадров, в распределенных системах управления массив координат точек траектории загружается в контроллер движения. После загрузки массива координат центральный процессор устанавливает признак «Загрузка завершена», по которому контроллер осуществляет ввод данных кадра, и переходит на подпрограмму «Интерпретации движения». Затем в регистры состояния и управления загружаются признаки «Пуск» и «Разрешение прерываний» и осуществляется вход в цикл фоновой программы, условием выхода из которого является признак «Завершение кадра» ( $Cdr = End$ ). После этого производится ввод информации следующего кадра и проверка признака «Завершение работы», соответствующего символу конца управляющей программы.

Алгоритм интерпретации движения (рис. 5) включает в себя вычисление приращений  $\Delta X, \Delta Y$  координат, загрузку признаков  $\text{sgn}\Delta X, \text{sgn}\Delta Y$  знака приращений и формирования модулей  $|\Delta X|, |\Delta Y|$  приращений, которые загружаются по адресам переменных  $\alpha_k, \beta_k$  конечных приращений. В случае отрицательных приращений формируется их дополнительный код.

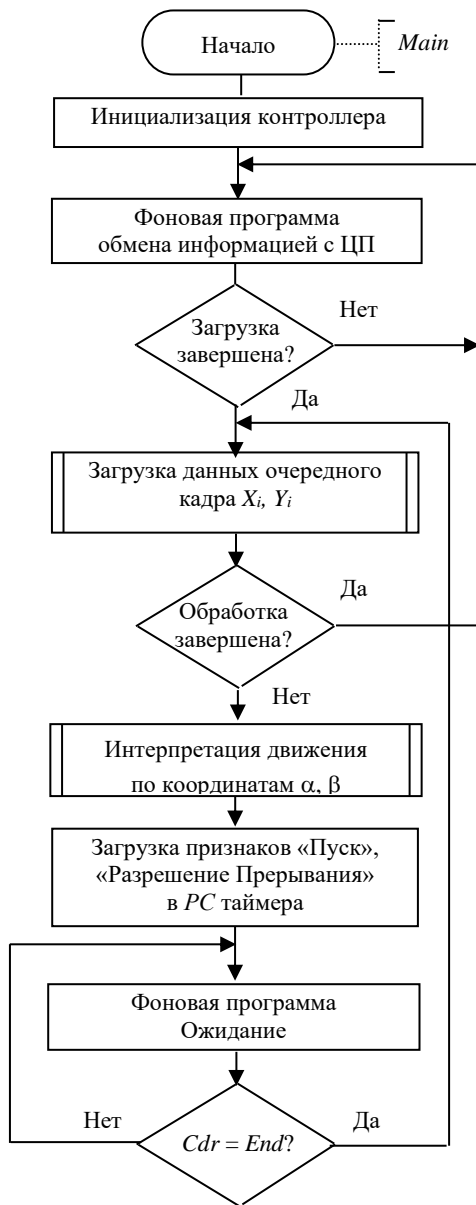


Рис. 4. Главный алгоритм контроллера

Fig. 4. The main algorithm of the controller



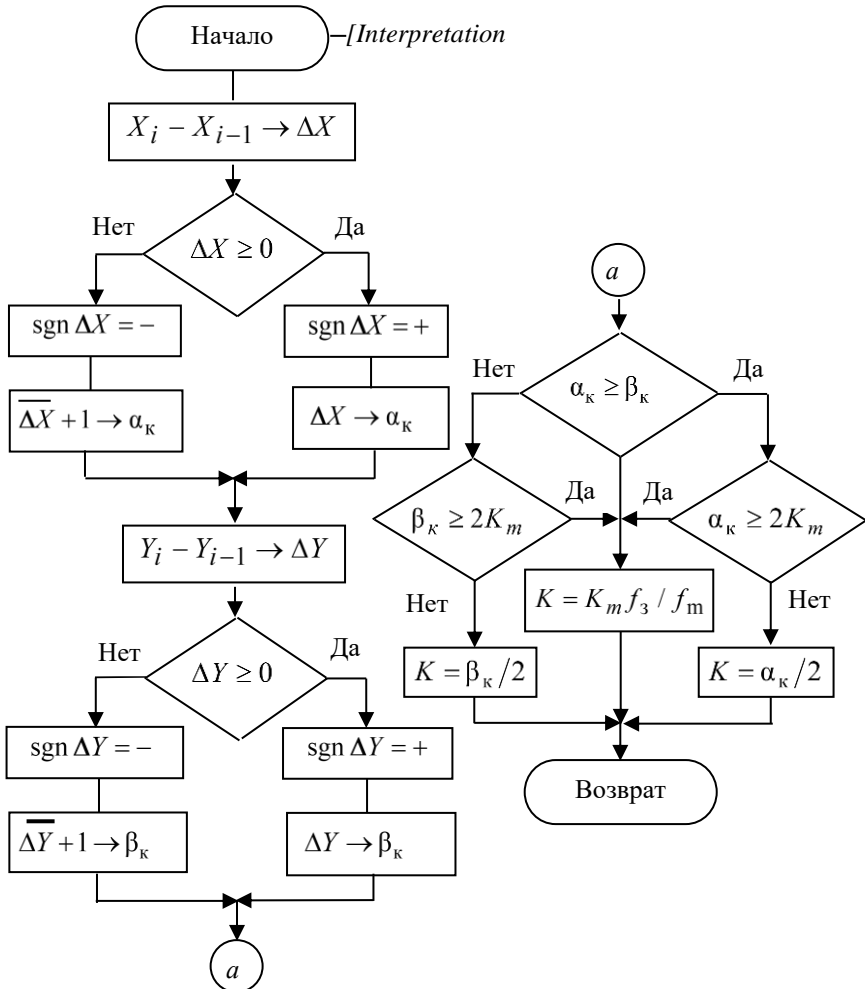


Рис. 5. Алгоритм интерпретации кадра

Fig. 5. Frame interpretation algorithm

В дополнительном фрагменте анализируются абсолютные значения приращения координат и определяется значение указателя  $K$ , соответствующего выходу на заданную частоту.

Алгоритм линейного интерполятора показан на рис. 6.

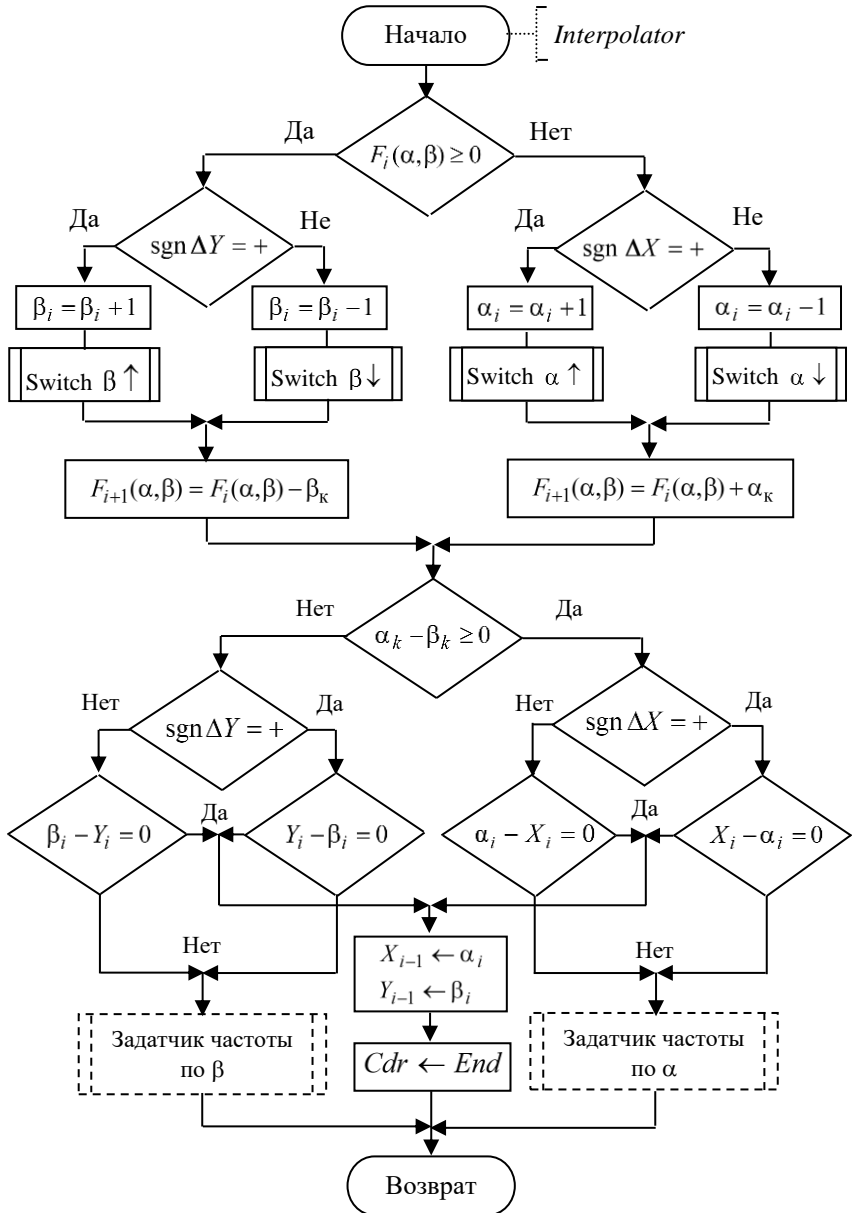


Рис. 6. Алгоритм линейного интерполятора

Fig. 6. Linear interpolator algorithm

Вход в алгоритм осуществляется по прерываниям, при этом выполнение фоновой программы приостанавливается. Вначале, в зависимости от знака оценочной функции, формируются две основные ветви решения, на которых анализируется знак приращений, формируется текущее значение обрабатываемых координат, производится вызов соответствующих программ «*Switch*» коммутации ШД и формируется новое значение оценочной функции. После этого сравниваются конечные значения координат участка траектории и производится анализ и формирование признака завершения «*Cdr = End*» отработки кадра по координате, имеющей наибольшее приращение. С помощью подпрограмм «Задатчика частоты» анализируются участки разгона, торможения и производится соответствующее изменение частоты входа в подпрограмму обслуживания прерывания. Штрихпунктирное выделение показывает возможный вариант вызова подпрограмм «Задатчика частоты» программным способом. В этом случае таймер работает в режиме делителя частоты. Второй вариант режима таймера предполагает вызов подпрограммы его обслуживания в произвольный момент времени по отношению к подпрограмме интерполятора. С учетом того, что тактовая частота МК выше частоты коммутации ШД на три и более порядков, возможное запаздывание существенным образом не влияет на выполнение программы интерполятора. Подпрограммы «*Switch*» коммутации обмоток ШД отличаются лишь направлением кольцевой выборки значений из одной таблицы коммутации. Стандартный режим работы ШД соответствует полношаговой или полушаговой коммутации. Для реализации микрошагового режима наиболее целесообразно использовать драйверы [9]. Математическое описание гибридных ШД и бесконтактных машин постоянного тока (БДПТ) подобно друг другу [10, 11]. Рассмотренные в данных работах принципы регулирования скорости в разомкнутых и замкнутых системах могут быть использованы при соответствующей доработке алгоритмов. В частности, с учетом свойств машин переменного тока, возможно зависимое регулирование частоты (рис. 3) и напряжения коммутатора ШД. В этом случае регулирование интервала перезагрузки регистра сравнения таймера можно обеспечить за счет подпрограммы его обслуживания.

#### IV. Заключение

В упрощенном варианте, с выводом графика траектории, основные алгоритмы были проверены в программном симуляторе системы команд процессора K1801BM2. Рассмотренные принципы отработки траектории позволяют работать как в правосторонней, так и в полной системе декартовых координат. Без существенного изменения алгоритмов, интерполятор может быть использован в качестве задатчика текущих значений координат сервоприводов, в которых регулирование частоты вращения ротора БДПТ

осуществляется за счет регулятора напряжения. При этом расширяются возможности регулирования напряжения, как в функции частоты, так и нагрузки за счет контроля углового рассогласования.

© Иванов В.М., 2023

*Поступила в редакцию 17.02.2023*

*Принята к печати 25.02.2023*

*Received 17.02.2023*

*Accepted 25.02.2023*

### Библиографический список

- [1] Koren Y. Interpolator for a computer numerical control system // *IEEE Transactions on Computers*. 1976. № 25 (1). С. 32-37. DOI: 10.1109/TC.1976.5009202
- [2] Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Системы числового программного управления. М.: Логос, 2005. – 296 с.
- [3] Байков В.Д., Вашкевич С.Н. Решение траекторных задач в микропроцессорных системах ЧПУ. Ленинград: Машиностроение, 1986. – 106 с.
- [4] Кошкин В.Л. Аппаратные системы числового программного управления. М.: Машиностроение, 1989. – 248 с.
- [5] Анишин Н.С. Цифровые интерполяторы криволинейных траекторий // *Автоматика и телемеханика*. 1986. № 12. С. 95-101.
- [6] Koren Y., Masory O. Reference-pulse circular interpolators for CNC systems // *Journal of Engineering for Industry*. 1981. № 103. P. 131-136.
- [7] Гусев Н.В., Букреев В.Г. Системы цифрового управления многокоординатными следящими электроприводами. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 213 с.
- [8] Баховцев И.А. Микропроцессорные системы управления устройствами силовой электроники: структуры и алгоритмы. Новосибирск: НГТУ, 2018. – 219 с.
- [9] User Manual DM542E 2-Phase Digital Stepper Drive. Revision 1.0 ©2016. China Leadshine Technology Co., Ltd. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.leadshunusa.com> (дата обращения 12.01.2023).
- [10] Иванов В.М. Исследование динамики следящего электропривода с вентильным двигателем в режиме автокоммутации // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016. Т. 17. № 2. С. 110-115. DOI: 10.17587/mau.17.110-115
- [11] Иванов В.М. Исследование режимов работы шагового привода // *Интеллектуальная электротехника*. 2018. № 2. С. 53-63. DOI: 10.46960/2658-6754\_2018\_2\_53

### References

- [1] Y. Koren, "Interpolator for a computer numerical control system", *IEEE Transactions on Computers*, vol. 25, no. 1, pp. 32-37, Jan. 1976. DOI: 10.1109/TC.1976.5009202
- [2] V.L. Sosonkin and G.M. Martinov. *Sistemy chislovogo programmogo upravleniya [Numerical control systems]*. Moscow: Logos, 2005 (in Russian).

- [3] V.D. Baykov and S.N. Vashkevich, *Reshenie traektornykh zadach v mikroprocessornykh sistemah [Solution of trajectory problems in microprocessor-based CNC systems]*. Leningrad: Mashinostroenie, 1986 (in Russian).
- [4] V.L. Koshkin, *Apparatnye sistemy chislovogo upravleniya [Hardware systems of numerical control]*. Moscow. Mashinostroenie, 1989 (in Russian).
- [5] N.S. Anishin, “Cifrovye interpolatory krivolinejnykh traektorij [Digital interpolators of curvilinear trajectories]”, *Avtomatika i Telemekhanika*, no. 12, pp. 95-101, 1986 (in Russian).
- [6] Y. Koren and O. Masory, “Reference-pulse circular interpolators for CNC systems”, *Journal of Engineering for Industry*, vol. 103, pp.131-136, Feb. 1981.
- [7] N.V. Gusev and V.G. Bukreev. *Sistemy. cifrovogo upravleniya mnogokoordinatnymi sledyashchimi elektroprivodami [Systems of digital control of multi-coordinate tracking electric drives]*. Tomsk: TPU, 2007 (in Russian).
- [8] I.A. Bakhovtsev. *Mikroprocessornye sistemy upravleniya ustrojstvami silovoj elektroniki: struktury i algoritmy [Microprocessor control systems for power electronics devices: structures and algorithms]*. Novosibirsk: NSTU, 2018 (in Russian).
- [9] User Manual DM542E 2-Phase Digital Stepper Drive. Revision 1.0 ©2016. China Leadshine Technology Co., Ltd. [Online]. Available at: <http://www.leadshineusa.com> [Accessed: Jan. 12, 2023].
- [10] V.M. Ivanov, “Dynamics of the servo drive brushless DC motor in the auto switching mode”, *Mechatronics, Automation, Control*, vol. 17, no. 2, pp. 110-115, 2016. DOI: 10.17587/mau.17.110-115
- [11] V.M. Ivanov, “Research of step drive operation modes”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 53-63, 2018. DOI: 10.46960/2658-6754\_2018\_2\_53

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Иванов Владимир Михайлович**, кандидат технических наук, доцент Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация.

**Vladimir M. Ivanov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.