

Расчет параметров САМ-кривой для управления сервосистемой станции разделения потока продукции термоупаковочной машины

К. С. Езеров✉, М. П. Белов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ ezerov95@yandex.ru

Аннотация. Описывается многодвигательная сервоприводная система машины, осуществляющей упаковку стеклянных бутылок в термоусаживаемую пленку. Разработана система управления сервоприводами Siemens Sinamics S120 на базе контроллера Siemens Simatic S7-15163-T для станции разделения непрерывного потока бутылок для последующей обработки. Приводится описание механики станции разделения. Проведен расчет коэффициентов полиномиальной функции для вычисления траектории движения ведомых исполнительных механизмов в зависимости от параметров продукта. Написана программа для промышленного контроллера, реализующая управление сервосистемой по принципу «ведущий–ведомый». Полученные результаты опробованы на промышленном оборудовании. Проанализированы результаты промышленной эксплуатации.

Ключевые слова: термоупаковочная машина, станция разделения продукта, многодвигательная сервосистема, САМ-кривые

Для цитирования: Езеров К. С., Белов М. П. Расчет параметров САМ-кривой для управления сервосистемой станции разделения потока продукции термоупаковочной машины // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 7. С. 103–112. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-103-112.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Calculation of CAM Curve Parameters for Servo Control of the Product Flow Separation Station of the Heat Packaging Machine

K. S. Ezerov✉, M. P. Belov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ ezerov95@yandex.ru

Abstract. A multi-drive servo system of a machine producing the packaging of glass bottles in shrinkable film is described. A Siemens Sinamics S120 servo control system has been developed based on the Siemens Simatic S7-15163-T controller for a continuous bottle flow separation station for subsequent processing. The mechanics of the separation station are described. The coefficients of the polynomial function are calculated to calculate the trajectory of the driven actuators depending on the product parameters. A program has been written for an industrial controller that implements the control of a servo system based on the master–slave principle. The results obtained have been tested on industrial equipment. The results of industrial operation are analyzed.

Keywords: heat packaging machine, product flow separation station, multi-drive servo system, CAM curves

For citation: Ezerov K. S., Belov M. P. Calculation of CAM Curve Parameters for Servo Control of the Product Flow Separation Station of the Heat Packaging Machine // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 7. P. 103–112. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-103-112.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Цель разработки. В ходе технического перевооружения термоупаковочной машины, осуществляющей упаковку стеклянных бутылок в термоусаживаемую пленку, было необходимо заменить устаревшую сервосистему Bosh Rexroth современной Siemens Sinamics S120. В ходе работы было обнаружено, что контроллер, вычисляющий задающее воздействие для сервоприводов, способен работать только с оборудованием Bosh Rexroth. Данный контроллер имел закрытое программное обеспечение, поэтому потребовалось разработать аналогичную программу «с нуля» на базе контроллера Siemens Simatic. Более конкретно задачу можно сформулировать как «сформировать зависимость между координатами исполнительных органов машины». В данной статье описывается расчет зависимости для узла разделения непрерывного потока продукции на группы, подлежащие дальнейшей упаковке.

Формирование профиля кулачка (если управление происходит с помощью механики) или САМ-кривой (если управление происходит электронно) – распространенная задача при автоматизации циклически работающих машин. Применяемые методы синтеза разнятся в зависимости от объекта управления. В [1] описывается синтез кулачка для механизмов, применяемых в строительстве, в [2] – в медицине, в [3] – в сельском хозяйстве, в [4] представлен общий подход по синтезу САМ-кривых без привязки к конкретным механизмам.

Описание структуры сервоприводов. В данной разработке применяется многодвигательная

сервоприводная система Siemens Sinamics с блоком управления сервосистемой CU320. Структурная схема сервоприводной системы представлена на рис. 1. Многодвигательный электропривод состоит из активного реверсивного выпрямителя Smart Line Module и четырех однодвигательных инверторов в формфакторе Booksize. Используются двигатели семейства Simotics, серии 1FT7 (М). Данные двигатели имеют встроенный абсолютный энкодер (Э) с разрешающей способностью 24 бита и преобразователь первичных данных, получаемых с энкодера, в протокол Drive CliQ.

Задающее воздействие вычисляется в промышленном контроллере Siemens Simatic S7-1516T-3 и передается в блок управления сервосистемой CU320 по сети Profinet. В данной статье была применена технология DSC (Dynamic Servo Control). Данная технология подразумевает каскадное управление скоростью или положением, причем регуляторы тока, скорости и положения рассчитываются на стороне контроллера сервосистемы CU320. Данный режим позволяет поднять время дискретизации расчетов (обычно период дискретизации контроллера сервосистемы равен 125 мкс, в то время как период дискретизации промышленного контроллера превышает 2000 мкс). На функциональной схеме сервосистемы (рис. 2) показано взаимодействие между промышленным контроллером и блоком управления сервосистемой через Profinet посредством стандартной телеграммы Siemens Telegram 105. Слова пронумерованы в соответствии с порядком их вхождения в телеграмму.

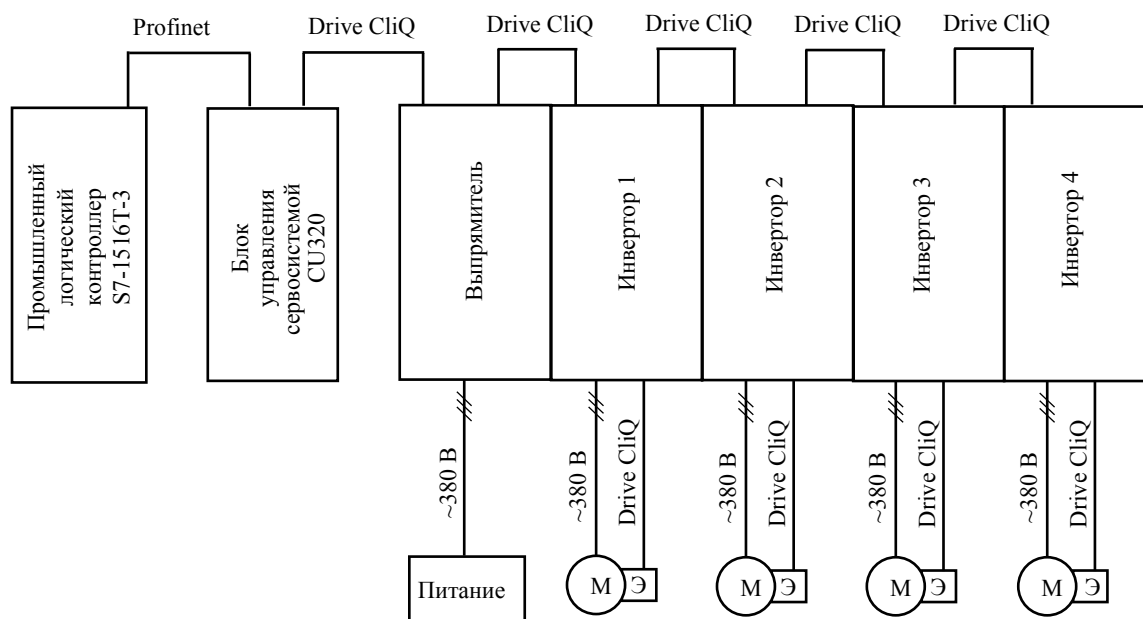


Рис. 1. Структурная схема многодвигательного сервопривода
Fig. 1. Block diagram for multidrive servo system

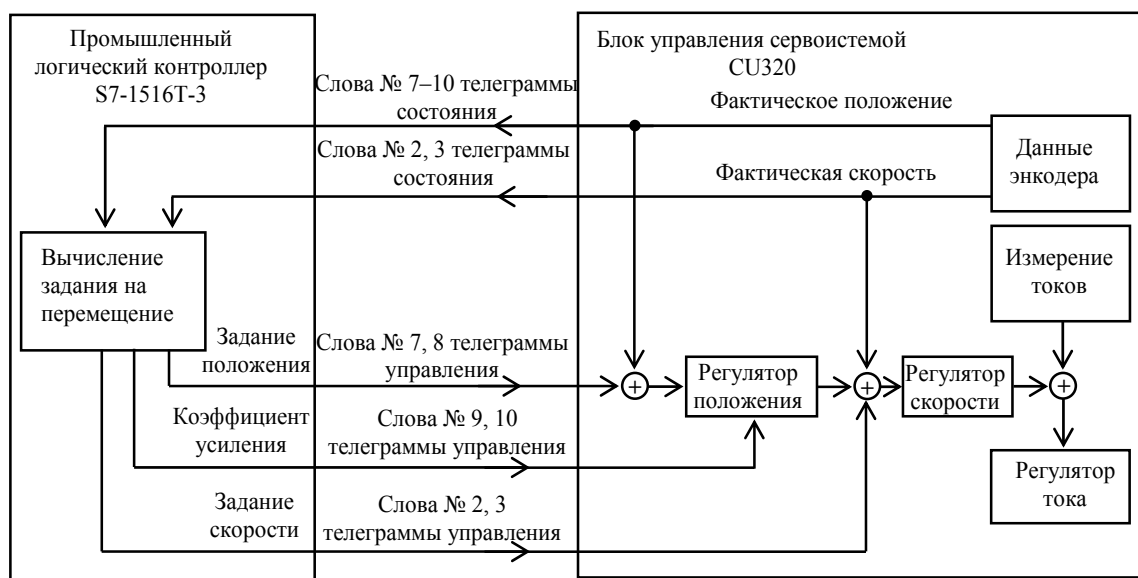


Рис. 2. Функциональная схема сервосистемы
Fig. 2. Block diagram for multidrive servo system

Вычисление задания на перемещение происходит в инкапсулированной части библиотеки Motion Control, предоставляемой фирмой Siemens. Взаимодействие с закрытой частью программы происходит через различные функциональные блоки, формирующие «задания» для сервосистемы. Например, функциональный блок MC_MoveRelative (рис. 3) задает перемещение исполнительного органа на определенное расстояние с заданными динамическими характеристиками.

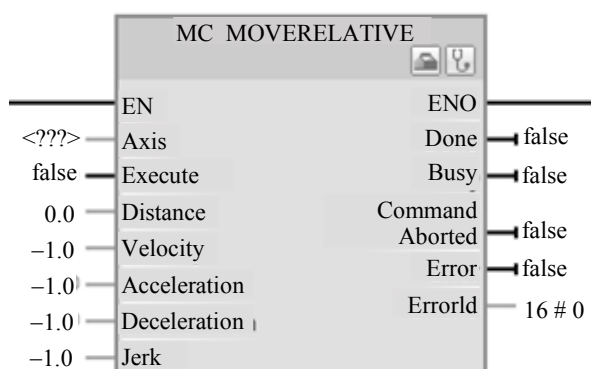


Рис. 3. Функциональный блок относительного перемещения (IDE TIA Portal v17)

Fig. 3. Functional block of relative motion (IDE TIA Portal v17)

Слева расположены входы блока: Axis – указатель на технологический объект (сервопривод, для которого формируется задание); Execute – сигнал запуска выполнения команды; Distance – расстояние, на которое должен переместиться исполнительный орган. Velocity, Acceleration, Deceleration, Jerk – динамические параметры, с которыми должно выполниться перемещение. Справа

расположены выходы: Done – сигнал успешного окончания выполнения задания; Busy – сигнал выполнения задания, Command Aborted – сигнал прерывания задания до его завершения; Error, ErrorId – сигнал ошибки и ее номер, соответственно.

Описание взаимодействия сервоприводов.

Как было сказано ранее, сервоприводная система имеет 4 серводвигателя. Первый серводвигатель приводит в движение механизмы транспортировки упаковываемых бутылок. Второй и третий серводвигатель приводят в движение исполнительные органы узла разделения продукта на группы (будут подробно описаны далее). Четвертый серводвигатель приводит в движение узел подачи пленки (в данной статье не описывается). Исполнительные органы связаны между собой зависимостью «ведущий–ведомый». Ведущим является сервопривод транспорта продукта, так как именно его координата определяет положение коробок с бутылками в любой момент времени. Далее данный сервопривод будем называть «главный привод».

Функциональная схема взаимодействия приводных объектов представлена на рис. 4, а и б, где M1, Э1 – двигатель и энкодер ведущей оси соответственно; M2, Э2 – двигатель и энкодер ведомой оси соответственно; $f(x)$ – функция, связывающая координаты ведомой и ведущей оси (далее САМ-кривая).

Технологический контроллер S7-1516T-3 позволяет описывать САМ-кривые (технологический объект ТО-Сам) с помощью полиномов до 6-го порядка и тригонометрическими функциями. В данной статье используются полиномиальные

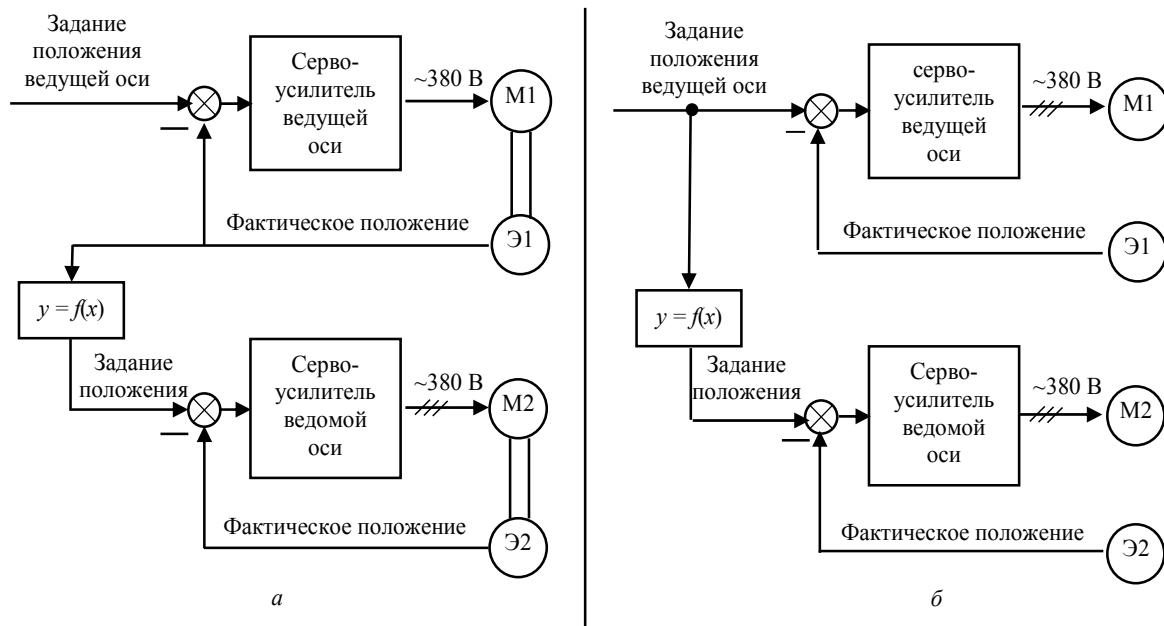


Рис. 4. Синхронизация приводов через сигналы: а – обратной связи; б – задания
Fig. 4. Drive synchronization via: а – feedback signal; б – reference signal

функции. Таким образом, можно сформулировать задачу разработки следующим образом: вычислить коэффициенты полиномов $f(x)$ в зависимости от параметров упаковываемых бутылок.

Описание механики станции деления. Станция деления служит для формирования отдельных групп бутылок из неупорядоченного потока. Сначала с помощью направляющих идет разделение продукта на ручьи (рис. 5). После этого с помощью двух сервоприводов идет формирование пробелов между ними.



Рис. 5. Разделение потока продукта на 4 ручья
Fig. 5. Collating product flow on 4 streams

Транспортер, перемещающий продукт по станции деления, движется с постоянной скоростью, зависящей от производительности машины. Пробелы формируются следующим образом: вдоль транспорта продукта установлены две пары

цепей, движимые двумя отдельными сервоприводами (А и Б). К цепям прикреплены планки с заходящими между банок стержнями (группирующие органы) (рис. 6, а, б).

Группирующие органы движутся с меньшей скоростью, чем транспортер продукта. Таким образом скорость продукта определяется группирующими органами, продукт проскальзывает по транспортеру.

При определенном положении «главного привода» (момент деблокировки) передний группирующий орган (на рис. 6 это стержень Б) ускоряется и уходит вниз, порция продукта освобождается и начинает двигаться со скоростью транспортера. Ускорившийся группировочный орган совершает неполный оборот и входит между бутылок позади второго группировочного органа (на рис. 6 это стержень А). На следующем такте машины ускоряться будет группировочный орган А.

Расчет коэффициентов полиномов САМ-кривых. Каждый исполнительный орган станции деления совершает один оборот за два такта машины. Вращение исполнительных органов сдвинуто друг относительно друга на один такт машины (один оборот ведущей оси). Для простоты синхронизации была создана виртуальная ось, вращающаяся синхронно с ведущей осью, но со скоростью в 2 раза меньшей. Назовем ее ось виртуальной осью станции деления. Таким образом, первый исполнительный орган станции деления синхронизируется непосредственно с виртуальной осью, второй – с виртуальной осью со смещением

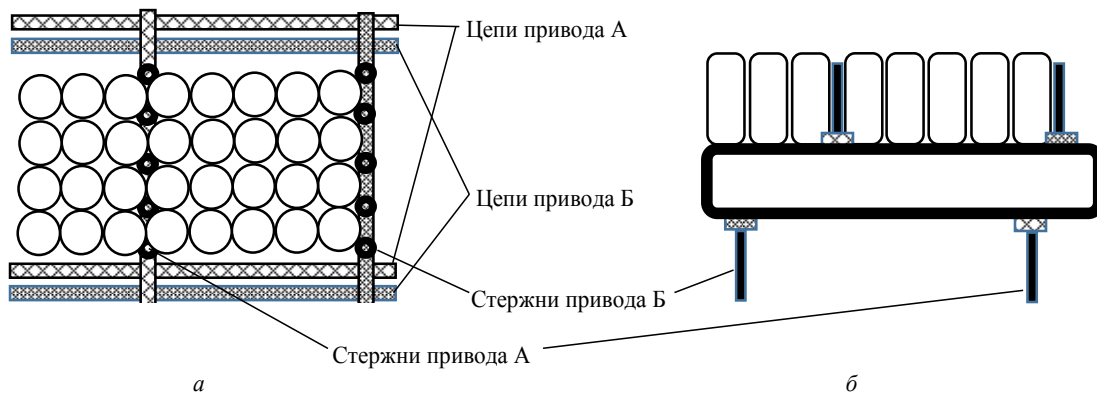


Рис. 6. Группирующие органы: а – вид сверху; б – вид сбоку
 Fig. 6. Grouping organs: а – top view; б – side view

на 180° , при пересчете на реальную ведущую ось получаем смещение на один такт машины.

В качестве исходных параметров имеем длину пакета бутылок (ширина коробки) и момент деблокировки (положение ведущей оси, когда передние группирующие органы должны ускориться, убирая препятствие перед одной партией продукта).

В качестве первоначальных умозаключений имеем следующее:

- за нулевую координату принимаем момент выхода группирующего стержня из-под транспорта бутылок (на рис. 7, а группирующий стержень А находится в начале отсчета координаты);
- от нулевой координаты до момента деблокировки группирующий орган движется с постоянной скоростью;
- в момент деблокировки группирующий орган должен увеличить скорость до превышающей скорость транспортера, убирая тем самым препятствие для бутылок (на рис. 7, б группирующий стержень Б начал ускорение);
- для обеспечения безударного вхождения группирующего стержня между бутылками каждый стержень при прохождении начала координат должен замедлиться до скорости, с которой двигался изначально.

Для вычисления полинома, связывающего координату виртуальной оси станции деления и ис-

полнительного органа (группирующего стержня), зададим функцию второй производной данной зависимости (при равномерном движении ведущей оси, вторая производная соответствует ускорению исполнительного органа). Вторая производная не должна иметь разрывов во избежание резкого изменения крутящего момента сервопривода. Наиболее простая функция, отвечающая начальным умозаключениям, – кусочно-линейная функция, состоящая из 4 сегментов (ее график показан на рис. 8):

$$y''(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < d; \\ \frac{4a_{\max}}{h}(x-d) & \text{при } d < x < d + \frac{h}{4}; \\ a_{\max} - \frac{4a_{\max}}{h}\left(x-d - \frac{h}{4}\right) & \text{при } d + \frac{h}{4} < x < d + \frac{3h}{4}; \\ -a_{\max} + \frac{4a_{\max}}{h}\left(x-d - \frac{3h}{4}\right) & \text{при } d + \frac{3h}{4} < x, \end{cases} \quad (1)$$

где d – координата, при которой начинается деблокировка; $a_{\max}$ – максимальное значение второй производной (вычисляется в зависимости от параметров); $h = 360^\circ - d$ – ширина участка деблокировки.

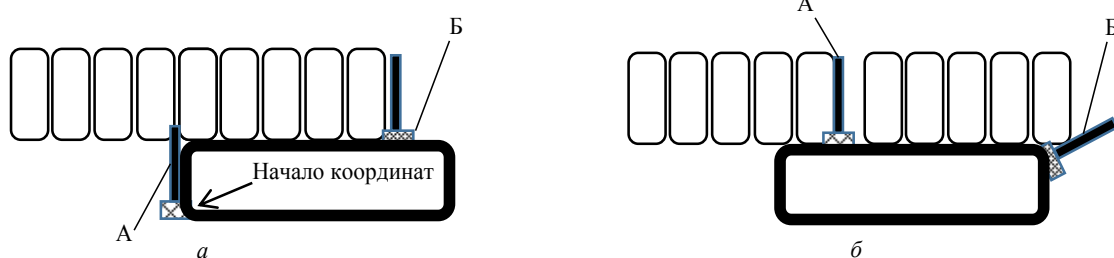


Рис. 7. Станции деления: а – в начальном положении; б – в момент деблокировки
 Fig. 7. Collating station: а – in start position; б – in the moment of unblocking

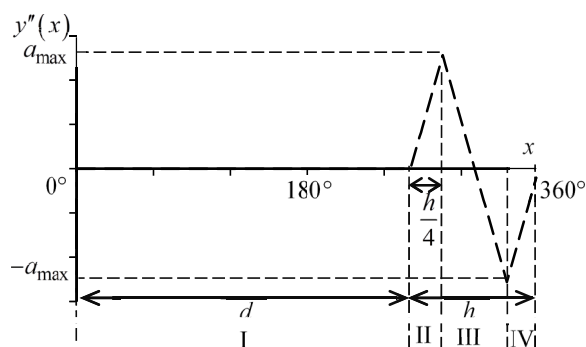


Рис. 8. График второй производной CAM-кривой
Fig. 8. Second derivative CAM curve plot

Особенностью задания параметров САМ-кривых в среде программирования промышленных контроллеров Siemens «TIA Portal V17» служит то, что начальная координата каждого нового отрезка имеет значение 0° . Смещение отрезка относительно абсолютной координаты x задается отдельно. Иными словами, среда разработки заменяет переменную для каждого отрезка. Таким образом, из полиномов исключаются величины, отвечающие за смещение отрезков вдоль оси x , что упрощает расчеты.

С учетом этого свойства обновим функцию (1) второй производной, получая выражение, где $x_2 = (x - d)$, $x_3 = \left(x - d - \frac{h}{4}\right)$, $x_4 = \left(x - d - \frac{3h}{4}\right)$;

$$y''(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < d; \\ \frac{4a_{\max}}{h}(x_2) & \text{при } d < x < d + \frac{h}{4}; \\ a_{\max} - \frac{4a_{\max}}{h}(x_3) & \text{при } d + \frac{h}{4} < x < d + \frac{3h}{4}; \\ -a_{\max} + \frac{4a_{\max}}{h}(x_4) & \text{при } d + \frac{3h}{4} < x. \end{cases} \quad (2)$$

Проинтегрируем выражение (2) для получения первой производной САМ-кривой. Интегралом от первого отрезка служит константа, которая соответствует постоянной скорости группирующего органа в диапазоне от 0° до момента деблокировки d . Определим эту скорость из следующего предположения: за один такт машины происходит обработка одной коробки бутылок, следовательно, ведущая ось делает оборот на 360° . Виртуальная ось станции деления сделает перемещение на 180° . За это время группирующий орган А (на рис 7, а) должен пройти расстояние, равное длине пакета бутылок (l), и оказаться в положении органа Б. Таким образом, значение

первой производной на первом участке будет равно $l/180$. Интеграл от (2) представлен ниже:

$$y'(x) = \begin{cases} \frac{l}{180} & \text{при } x < d; \\ \frac{2a_{\max}}{h}(x_2)^2 + C_2 & \text{при } d < x < d + \frac{h}{4}; \\ -\frac{2a_{\max}}{h}(x_3)^2 + a_{\max}x_3 + C_3 & \text{при } d + \frac{h}{4} < x < d + \frac{3h}{4}; \\ \frac{2a_{\max}}{h}(x_4)^2 - a_{\max}x_4 + C_4 & \text{при } d + \frac{3h}{4} < x. \end{cases}$$

При равномерном движении ведущей оси первая производная САМ-кривой соответствует скорости ведомой оси, поэтому необходимо обеспечить отсутствие разрывов в данной функции. Равенство граничных условий будет обеспечено при вычислении постоянных интегрирования.

Граница I и II отрезков: $\frac{l}{180} = \frac{2a_{\max}}{h}(0)^2 + C_2$,

откуда $C_2 = l/180$.

Граница отрезков II и III:

$$\frac{2a_{\max}}{h}\left(\frac{h}{4}\right)^2 + C_2 = -\frac{2a_{\max}}{h}(0)^2 + a_{\max} \cdot 0 + C_3,$$

откуда $C_3 = C_2 + \frac{a_{\max}h}{8} = \frac{l}{180} + \frac{a_{\max}h}{8}$.

Граница отрезков III и IV:

$$\begin{aligned} -\frac{2a_{\max}}{h}(h/2)^2 + a_{\max} \frac{h}{2} + C_3 &= \\ = \frac{2a_{\max}}{h}(0)^2 - a_{\max} \cdot 0 + C_4, \end{aligned}$$

откуда $C_4 = C_3 = l/180 + a_{\max}h/8$.

Таким образом, после вычисления постоянных интегрирования C_2 – C_4 получаем выражение для первой производной САМ-кривой:

$$y'(x) = \begin{cases} \frac{l}{180} & \text{при } x < d; \\ \frac{2a_{\max}}{h}(x_2)^2 + \frac{l}{180} & \text{при } d < x < d + \frac{h}{4}; \\ -\frac{2a_{\max}}{h}(x_3)^2 + a_{\max}x_3 + \frac{l}{180} + \frac{a_{\max}h}{8} & \text{при } d + \frac{h}{4} < x < d + \frac{3h}{4}; \\ \frac{2a_{\max}}{h}(x_4)^2 - a_{\max}x_4 + \frac{l}{180} + \frac{a_{\max}h}{8} & \text{при } d + \frac{3h}{4} < x. \end{cases} \quad (3)$$

График первой производной САМ-кривой изображен на рис. 9

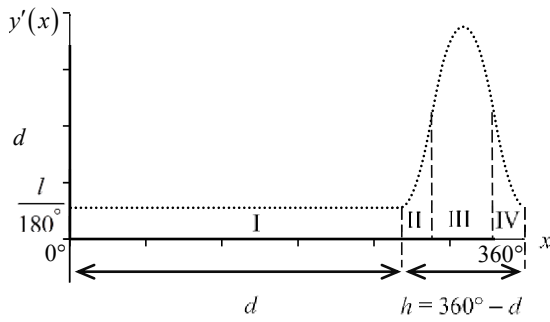


Рис. 9. График первой производной САМ-кривой
Fig. 9. First derivative CAM curve plot

В (1)–(3) присутствует параметр $a_{\max}$. Данная величина будет вычислена исходя из того, что максимальное значение функции, задающей САМ-кривую, равно 360° (полный оборот исполнительного органа).

Поскольку величины d (момент деблокировки) и l (длина пакета бутылок) заданы параметрами продукта, параметр h рассчитывается исходя из d ($h = 360^\circ - d$), неизвестным коэффициентом в уравнениях (1)–(3) остается только $a_{\max}$. Проинтегрировав уравнения (3) в соответствующих пределах и приравняв результат к 360° , получим выражение для вычисления параметра $a_{\max}$:

$$360^\circ = \int_0^{360^\circ-h} \frac{l}{180^\circ} dx_1 + \int_0^{\frac{h}{4}} \left(\frac{2a_{\max}}{h} (x_2)^2 + \frac{l}{180^\circ} \right) dx_2 + \int_0^{\frac{h}{2}} \left(-\frac{2a_{\max}}{h} (x_3)^2 + a_{\max} x_3 + \frac{l}{180^\circ} + \frac{a_{\max} h}{8} \right) dx_3 + \int_0^{\frac{h}{4}} \left(\frac{2a_{\max}}{h} (x_4)^2 - a_{\max} x_4 + \frac{l}{180^\circ} + \frac{a_{\max} h}{8} \right) dx_4.$$

Раскрыв интегралы, получаем $360^\circ = 2l + \frac{a_{\max} h^2}{8}$, откуда

$$a_{\max} = \frac{8(360^\circ - 2l)}{h^2}. \quad (4)$$

Для определения искомой функции необходимо взять неопределенный интеграл от выражения (3):

$$y(x) = \begin{cases} \frac{l}{180^\circ} x_1 + C_1 & \text{при } x < d; \\ \frac{2a_{\max}}{3h} (x_2)^3 + \frac{l}{180^\circ} x_2 + C_2 & \text{при } d < x < d + \frac{h}{4}; \\ -\frac{2a_{\max}}{3h} (x_3)^3 + \frac{a_{\max}}{2} (x_3)^2 + \left(\frac{l}{180^\circ} + \frac{a_{\max} h}{8} \right) x_3 + C_3 & \text{при } d + \frac{h}{4} < x < d + \frac{3h}{4}; \\ \frac{2a_{\max}}{3h} (x_4)^3 - \frac{a_{\max}}{2} (x_4)^2 + \left(\frac{l}{180^\circ} + \frac{a_{\max} h}{8} \right) x_4 + C_4 & \text{при } d + \frac{3h}{4} < x. \end{cases}$$

Постоянные интегрирования рассчитываются, исходя из равенства граничных значений соседних отрезков:

$$\begin{aligned} C_1 &= 0; \quad C_2 = \frac{l}{180^\circ} d; \\ C_3 &= \frac{2a_{\max}}{3h} \left(\frac{h}{4} \right)^3 + \frac{l}{180^\circ} \frac{h}{4} + C_2 = \\ &= \frac{a_{\max} h^2}{96} + \frac{l}{180^\circ} \frac{h}{4} + \frac{l}{180^\circ} d; \\ C_4 &= -\frac{2a_{\max}}{3h} \left(\frac{h}{2} \right)^3 + \frac{a_{\max}}{2} \left(\frac{h}{2} \right)^2 + \left(\frac{l}{180^\circ} + \frac{a_{\max} h}{8} \right) \times \\ &\times \frac{h}{2} + C_3 = \frac{l}{180^\circ} \left(d + \frac{3}{4} h \right) + \frac{11}{96} a_{\max} h^2. \end{aligned}$$

Рассчитанные коэффициенты заносятся в структуру технологического объекта ТО-Сам. Результат расчета представлен на рис. 10. Сплошная линия – $y(x)$, зависимость координаты ведомой оси (САМ-функция); штрихпунктирная – $y'(x)$, первая производная САМ-функции (при равномерном движении ведущего – эквивалентна скорости ведомого); штриховая – $y''(x)$, вторая производная САМ-функции (при равномерном движении ведущего – эквивалентна ускорению ведомого). Причем $y(360^\circ) = 360^\circ$, что косвенно подтверждает правильность расчетов.

Связь ведущей и ведомой осей происходит в программе промышленного контроллера с помощью функционального блока библиотеки MotionControl «MC_CAMIN» (рис. 11). Блок обладает следующим интерфейсом: Master, Slave, Cam – указатели на технологические объекты ведущей, ведомой осей и САМ-кривой соответственно; Execute – бит, запускающий процесс синхронизации; Scaling позволяет масштабировать координату ведущей и/или ведомой оси; MasterSyncPosition –

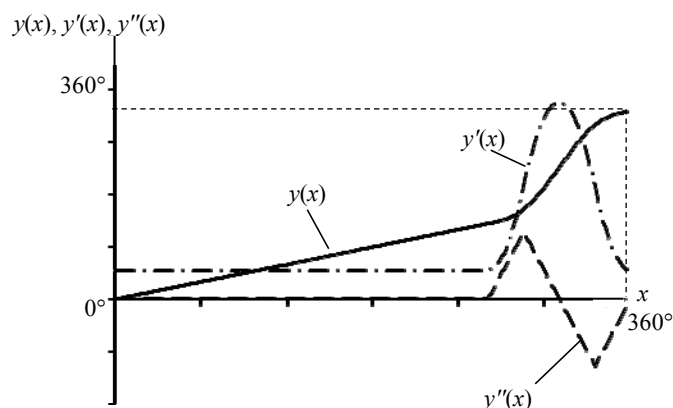


Рис. 10. График искомой CAM-кривой,
ее первой и второй производной
Fig. 10. Required CAM curve, its first and
second derivative plot

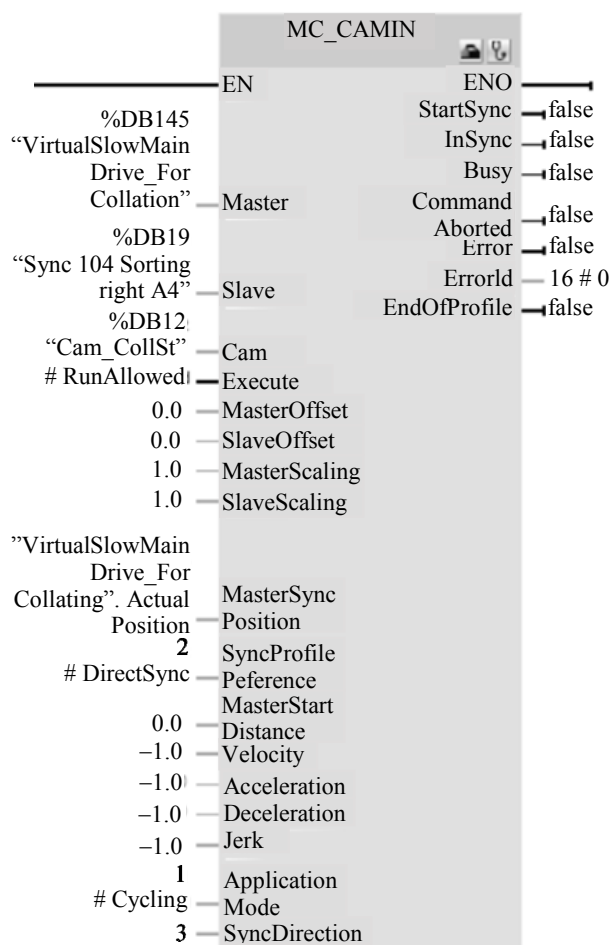


Рис. 11. Функциональный блок ввода ведущей и ведомой осей в синхронизм (IDE TIA Portal v17)

Fig. 11. Functional block for synchronization of master and slave axis (IDE TIA Portal v17)

абсцисса CAM-кривой, в точке синхронизации (определяет место на CAM-кривой, с которого начнется движение); SyncProfileReference – метод входа осей в синхронизм. Выбран тип входа DirectSync. Данный метод позволяет синхронизировать остановленные оси в точке, определенной

параметром MasterSyncPosition. Application mode задает режим работы при выходе координаты ведомой оси за область определения CAM-кривой. В случае выбора режима Cycling при выходе за область определения рабочая точка на CAM-кривой будет возвращена на абсциссу, равную 0°

(работа САМ-кривой будет зациклена). Остальные настройки не учитываются программой при выборе типа синхронизации «Direct Sync».

Обсуждение результатов. Анализ выражения для максимального ускорения (4) показывает, что максимальная длина пакета обрабатываемых бутылок – 180° (в пересчете из миллиметров в градусы поворота исполнительного органа). Причем чем ближе длина пакета к значению 180° , тем меньше ускорение. При упаковке стандартных коробок шириной 4–6 бутылок ускорение исполнительного органа в пределах нормы. Неудовлетворительная работа наблюдается при ширине пакета бутылок 3 штуки и менее, так как исполь-

зованный метод расчета получает слишком большое ускорение исполнительного органа. Во избежание данного негативного эффекта требуется усложнить профиль САМ-кривой. Эта задача станет предметом дальнейших разработок.

Заключение. В ходе данных исследований был выполнен расчет САМ-функции, обеспечивающей синхронное движение исполнительных органов станции деления. Показаны ее достоинства и недостатки. Данный алгоритм был использован при техническом перевооружении трех термоупаковочных машин, в ходе наладки и эксплуатации показал свою работоспособность. На момент публикации статьи эксплуатация идет более года.

Список литературы

1. Ловейкин В. С., Почка К. И. Синтез кулачкового приводного механизма роликовой формовочной установки с комбинированным режимом движения по ускорению третьего порядка // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 3. С. 206–214. doi: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-206-214.
2. Беляев Л. В., Шевченко А. П., Жданов А. В. Геометрический синтез пространственного кулачкового механизма мехатронного модуля для систем вспомогательного кровообращения // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. С. 38–45.

3. Синтез кулачкового механизма / Л. А. Кулешова, К. Е. Муравьев, С. Н. Перцев, А. А. Матющенко // Результаты современных НИР: Сб. ст. VI Всерос. науч.-практ. конф.: в 2 ч. Ч. 1. Пенза: Наука и Просвещение, 2019. С. 45–48.
4. Paleva-Kadiyska B., Roussev R., Galabov V. Rational possibility of generating power laws in the synthesis of cam mechanisms // Advanced Engin. Research. 2021. Vol. 21, no. 2. P. 184–190. doi: 10.23947/2687-1653-2021-21-2-184-190.

Информация об авторах

Езеров Кирилл Сергеевич – аспирант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: ezerov95@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0000-8466-600X>

Белов Михаил Петрович – д-р техн. наук, профессор кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: milesa58@mail.ru

References

1. Lovejkin V. S., Pochka K. I. Sintez kulachkovogo privodnogo mehanizma rolikovoj formovочноj ustanovki s kombinirovannym rezhimom dvizhenija po uskoreniju tret'ego porjadka // Nauka i tehnika. 2017. T. 16, № 3. S. 206–214. doi: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-206-214. (In Russ.).
2. Beljaev L. V., Shevchenko A. P., Zhdanov A. V. Geometricheskij sintez prostranstvennogo kulachkovogo mehanizma mehatronnogo modulja dlja sistem vspomogatel'nogo krovoobrashhenija // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2013. № 4. S. 38–45. (In Russ.).

3. Sintez kulachkovogo mehanizma / L. A. Kuleshova, K. E. Murav'ev, S. N. Percev, A. A. Matjushhenko // Rezul'taty sovremennyh NIR: Sb. st. VI Vseross. nauch.-prakt. konf.: v 2 ch. Ch. 1. Penza: Nauka i Prosveshhenie, 2019. S. 45–48. (In Russ.).
4. Paleva-Kadiyska B., Roussev R., Galabov V. Rational possibility of generating power laws in the synthesis of cam mechanisms // Advanced Engin. Research. 2021. Vol. 21, no. 2. P. 184–190. doi: 10.23947/2687-1653-2021-21-2-184-190.

Information about the authors

Kirill S. Ezerov – postgraduate student of the Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: ezerov95@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0000-8466-600X>

Mikhail P. Belov – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: milesa58@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.03.2025; принята к публикации после рецензирования 06.05.2025; опубликована онлайн 29.09.2025.

Submitted 11.03.2025; accepted 06.05.2025; published online 29.09.2025.
