

Подход к реализации функциональных блоков спецификации PLCopen

Н. Д. Байков¹, А. Н. Годунов²

¹НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ, Москва, Россия, nknikita@niisi.ras.ru;

²НИЦ «Курчатовский институт» – НИИСИ, Москва, Россия, nkag@niisi.ras.ru;

Аннотация. В работе рассмотрены возможные подходы к реализации функциональных блоков для библиотеки управления работой электропривода, разрабатываемой в целях импортозамещения иностранного программного обеспечения в сфере автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Ключевые слова: функциональный блок, библиотека управления движением, АСУ ТП, ПЛК

1. Введение

В условиях современного мира повсеместное внедрение новых, а также поддержание и дальнейшее совершенствование эффективности существующих средств автоматизации управления технологическими процессами является одним из приоритетных направлений деятельности для экономики и многих других связанных с ней сфер. По причине своей высокой практической важности, а также из-за разнообразия прикладных областей, в которых применение автоматизированных систем управления обладает различной спецификой, за годы внедрения на рынке сформировалось множество поставщиков различного оборудования и готовых решений на его основе. В целях обеспечения совместимости оборудования между собой были разработаны отраслевые стандарты и вспомогательные документы, среди которых важное значение имеют стандарты IEC 61800 [1], IEC 61131 [2] и спецификация PLCopen [3].

Стандарт IEC 61800 состоит из нескольких частей, в которых по группам разделены требования к техническим характеристикам и различным аспектам реализации силовых электроприводов с регулируемой скоростью. В том числе, в состав стандарта IEC 61800 входит несколько частей IEC 61800-7-*, в которых собраны вместе требования по унификации профиля взаимодействия с электроприводом. Данные требования базируются на спецификации CiA 402 [4], определяющей команды управления для переключения электропривода в различные режимы работы. Например, переключение в режим работы, при котором инициируется перемещение электропривода в заданную позицию или разгон электропривода до заданного значения скорости. При этом непосредственная доставка команд от центрального процессорного модуля

программируемого логического контроллера (далее – ПЛК) к электроприводу может осуществляться различными способами, как например, при помощи протоколов EtherCAT, PROFINET, EtherNet/IP, POWERLINK, Modbus TCP, CANopen, применение которых стандартизировано в рамках IEC 61800.

Как правило, разработчики прикладного ПО не описывают логику управления электроприводом напрямую в терминах переключения между различными режимами работы, описанными в стандарте IEC 61800. Вместо этого разработка прикладного ПО ведется в специализированных средах разработки на более высоком уровне абстракции. Основными элементами в этих средах служат функциональные блоки (далее – ФБ), для которых определены наборы входных и выходных переменных, а также действия, выполняемые электроприводом в результате их вызова. В сравнении с режимами работы стандарта IEC 61800, ФБ могут определять более сложные режимы работы и действия. Например, одним из встречающихся на практике является ФБ MC_PositionProfile, в результате выполнения которого электропривод должен последовательно переместиться между заданным набором позиций через заданные интервалы времени. Задачей разработчика прикладного ПО в этом случае становится комбинирование между собой экземпляров различных ФБ с целью получения нужной ему траектории движения электропривода. Для этой цели используются специализированные текстовые и графические языки программирования, как например, язык структурированного текста ST или графический язык функциональных блоковых диаграмм FBD. Синтаксис и семантика этих и других языков стандартизованы в одной из частей стандарта IEC 61131-3. Спецификация PLCopen, в свою

очередь, определяет для сред разработки номенклатуру и интерфейс рекомендуемых к реализации ФБ (поддерживается в ряде широко известных сред разработки, как например, CODESYS или Beckhoff TwinCAT). Таким образом, на среду разработки ложатся дополнительные сервисные функции по трансляции экземпляров ФБ в команды управления электроприводом в соответствии со стандартом IEC 61800. Как правило, они реализуются в виде вспомогательных библиотек управления движением (Motion Control Libraries) и средств кодогенерации, включаемых в состав сред разработки.

Одним из недостатков существующих решений по автоматизации систем управления в контексте стратегической цели по импортозамещению иностранного ПО можно считать их проприетарность. В связи с этим актуальной задачей является разработка отечественных средств автоматизации.

В настоящей работе на примере нескольких алгоритмов продемонстрированы возможные подходы к реализации ФБ MC_PositionProfile. Эти подходы исследовались в рамках разработки среды исполнения прикладного ПО для Багет-ПЛК1/2 [5,6] на основе операционной системы реального времени OCPV Багет 3.x [7] и совместно с использованием свободно распространяемой среды разработки Beremiz [8].

2. Описание интерфейса ФБ MC_PositionProfile

MC_PositionProfile является одним из ФБ, рекомендуемых к реализации в спецификации PLCopen. Согласно требованиям спецификации, одной из обязательных входных переменных для ФБ MC_PositionProfile должна являться переменная TimePosition, которая фактически является ссылкой на массив из пар (dT_i, p_i) произвольной длины N . Для простоты исключим из дальнейшего рассмотрения буферизацию при выполнении последовательных экземпляров ФБ (управляется при помощи необязательной по требованиям спецификации PLCopen входной переменной BufferMode) и будем рассматривать только случай немедленного начала движения при вызове экземпляра ФБ MC_PositionProfile. Тогда при вызове электропривод из своей текущей позиции p_0 должен последовательно переместиться между позициями $p_i, i = \overline{1, N}$ через заданные интервалы времени длины $dT_i, i = \overline{1, N}$. При этом спецификация PLCopen не определяет явным образом конкретную траекторию при обходе позиций $p_i, i = \overline{1, N}$. Данная задача имеет множество способов

решения. Несколько из них предложены в следующих разделах.

3. Описание режима работы электропривода PV

Для построения возможных решений задачи вычисления траектории для ФБ MC_PositionProfile будем использовать команды переключения электропривода в режим работы Profile Velocity Mode (далее – PV). Приведем краткое описание данного режима работы электропривода. Согласно спецификации CiA 402, требования которой закреплены в стандарте IEC 61800, при переключении в режим PV электропривод должен совершать движение, которому соответствует график скорости, изображенный на Рис. 1.

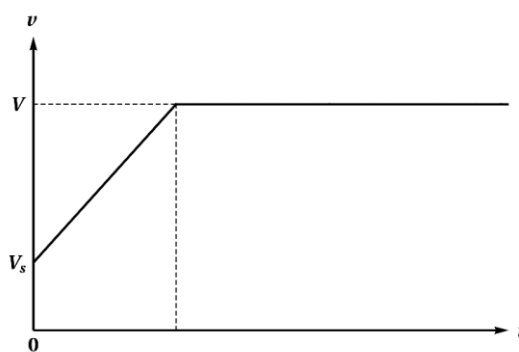


Рис. 1. График скорости в режиме PV

Управляющими параметрами движения электропривода в режиме PV являются:

- V – скорость движения электропривода, которую необходимо достигнуть и далее поддерживать постоянной;
- a – ускорение электропривода на участках движения, на которых энергия электропривода возрастает (т.е. на участках увеличения скорости электропривода по абсолютной величине; должна задаваться как положительная величина);
- d – торможение (аналогично ускорению, но используется на участках движения, на которых энергия электропривода убывает; также должно задаваться как положительная величина).

При этом, как видно из Рис. 1, скорость движения электропривода V_s в начальный момент времени может быть ненулевой (например, если команда переключения в режим PV прервала выполнение другой ранее полученной команды).

Также следует отметить, что на Рис. 1 изображен пример движения, при котором скорости V_s и V имеют одинаковый знак, поэтому движение электропривода состоит из двух

участков: участка разгона с ускорением a (поскольку $0 < V_s < V$) и участка движения с постоянной скоростью V . В том случае, если начальная и конечная скорость имеют разные знаки, а значения a и d отличаются по величине, график скорости уже будет состоять из трех участков, т.к. при переходе через нулевое значение скорости наклон графика будет меняться (электропривод переходит от торможения с ускорением d к разгону с ускорением a). В предлагаемых ниже способах решения задачи рассматривается только случай $a = d$. Для него график скорости останется состоящим из двух участков даже в случае несовпадения знаков V_s и V , т.к. участки разгона и торможения на графике скорости будут иметь одинаковый наклон

4. Способ 1. Кусочно-линейная функция скорости с участками движения с постоянной скоростью

Как уже было сформулировано выше, задача построения траектории движения, проходящей через позиции p_i через интервалы времени длины dT_i , имеет множество решений. Например, может быть построено семейство решений с полной остановкой электропривода в каждой промежуточной позиции p_i . Однако такие решения в большинстве случаев не будут являться практичными из-за частой смены

участков разгона и торможения, нужных только для того, чтобы обеспечить полную остановку электропривода в позициях p_i . Построим другое решение задачи с более плавным изменением скорости при перемещении через позиции p_i .

Для однозначной разрешимости задачи введем управляющий коэффициент $0 < \alpha < 0.5$. Будем искать решение задачи в таком виде, чтобы:

- на участках $\sum_{k=1}^{i-1} dT_k + \alpha dT_i \leq t \leq \sum_{k=1}^{i-1} dT_k + (1 - \alpha)dT_i$, $i = \overline{1, N}$ движение электропривода являлось поступательным с постоянными скоростями V_i ;

- на оставшихся участках функция скорости электропривода являлась линейной функцией времени t и определялась по непрерывности из условия, чтобы обеспечить переключение между соседними значениями V_i и V_{i+1} .

При этом необходимо дополнительно учесть краевые условия. В начальный момент времени $t = 0$ электропривод должен иметь позицию p_0 и скорость V_s . Краевое условие в конечной позиции p_N зададим как $V = V_e$, где V_e – обозначает заданное значение конечной скорости. В простейшем случае она может быть задана как нулевая, что будет приводить к полной остановке электропривода в момент завершения выполнения экземпляра ФБ MC_PositionProfile.

График функции скорости искомого решения задачи изображен на Рис. 2.

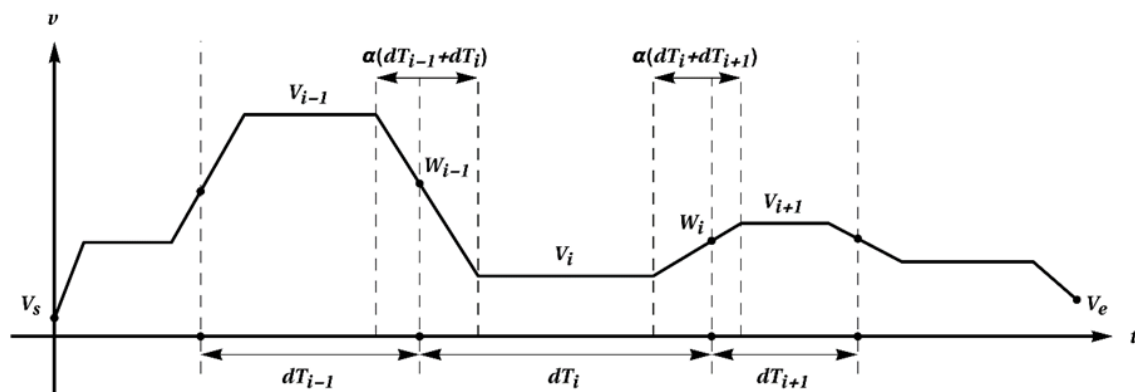


Рис. 2. График функции скорости искомого решения задачи

Введем обозначения W_i для значений скорости в точках $\sum_{k=1}^i dT_k$, $i = \overline{0, N}$ (значение $i = 0$ соответствует точке $t = 0$). Из линейности искомой функции скорости получаем:

$$\begin{aligned} W_i &= V_i + \frac{V_{i+1} - V_i}{\alpha(dT_i + dT_{i+1})} \alpha dT_i \\ &= \frac{dT_i}{dT_i + dT_{i+1}} V_{i+1} + \frac{dT_{i+1}}{dT_i + dT_{i+1}} V_i, \end{aligned}$$

$$i = \overline{1, N-1}$$

$$W_0 = V_s, \quad W_N = V_e$$

Скорости W_i соответствуют скоростям мотора в момент прохождения через позиции p_i .

С использованием введенных обозначений вычислим коэффициенты системы линейных уравнений для нахождения элементов массива скоростей $\{V_i, i = \overline{1, N}\}$. Для этого

воспользуемся тем, что изменение позиции на каждом временном отрезке определяется площадью под графиком скорости:

$$p_i = p_{i-1} + \frac{W_{i-1} + V_i}{2} (\alpha dT_i) + V_i(1 - 2\alpha)dT_i + \frac{V_i + W_i}{2} (\alpha dT_i), \quad i = \overline{1, N}$$

Отсюда получаем

$$2 \frac{p_i - p_{i-1}}{dT_i} = (W_{i-1} + V_i)\alpha + 2V_i(1 - 2\alpha) + (V_i + W_i)\alpha, \quad i = \overline{1, N}$$

При $i = \overline{2, N-1}$ подставим в уравнение выше вместо значений W_{i-1} и W_i их выражения через V_{i-1} , V_i и V_{i+1} и приведем подобные слагаемые:

$$2 \frac{p_i - p_{i-1}}{dT_i} = \frac{\alpha dT_i}{dT_{i-1} + dT_i} V_{i-1} + \left(2 - 2\alpha + \frac{\alpha dT_{i-1}}{dT_{i-1} + dT_i} + \frac{\alpha dT_{i+1}}{dT_{i+1} + dT_i}\right) V_i + \frac{\alpha dT_i}{dT_{i+1} + dT_i} V_{i+1}, \quad i = \overline{2, N-1}$$

При выводе уравнений для $i = 1$ и $i = N$ пользуемся тем, что $W_0 = V_s$ и $W_N = V_e$:

$$\begin{aligned} & 2 \frac{p_1 - p_0}{dT_1} - \alpha V_s \\ &= \left(2 - 2\alpha + \frac{\alpha dT_2}{dT_1 + dT_2}\right) V_1 + \frac{\alpha dT_1}{dT_1 + dT_2} V_2, \\ & 2 \frac{p_N - p_{N-1}}{dT_N} - \alpha V_e \\ &= \frac{\alpha dT_N}{dT_{N-1} + dT_N} V_{N-1} \left(2 - 2\alpha + \frac{\alpha dT_{N-1}}{dT_{N-1} + dT_N}\right) V_N \end{aligned}$$

Таким образом, мы получили систему линейных уравнений с трехдиагональной матрицей для нахождения неизвестных значений скоростей V_i , $i = \overline{1, N}$. Полученная матрица имеет строгое диагональное преобладание (для каждого из элементов матрицы на главной диагонали, его абсолютное значение превосходит сумму абсолютных значений всех остальных элементов матрицы в этой же строке). Для решения такой системы линейных уравнений можно применить метод прогонки [9].

Ускорения выражаются через найденные из решения системы линейных уравнений значения функции скоростей V_i :

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{V_1 - V_s}{\alpha dT_1} \\ a_i &= \frac{V_{i+1} - V_i}{\alpha(dT_i + dT_{i+1})}, \quad i = \overline{1, N-1} \\ a_N &= \frac{V_e - V_N}{\alpha dT_N} \end{aligned}$$

Итоговый алгоритм отправки команд электроприводу для реализации ФБ MC_PositionProfile имеет следующий вид:

- в начальный момент времени $t = 0$ электроприводу посылается команда переключения в режим PV со значениями управляющих параметров $V = V_1$ и $a = d = |a_0|$;

- в каждый из моментов времени $\sum_{k=1}^{i-1} dT_k + (1 - \alpha)dT_i$, $i = \overline{1, N-1}$ электроприводу посылается новая команда переключения в режим PV со значениями управляющих параметров $V = V_{i+1}$ и $a = d = |a_i|$;

- в момент времени $\sum_{k=1}^{N-1} dT_k + (1 - \alpha)dT_N$ электроприводу посылается последняя команда переключения в режим PV со значениями управляющих параметров $V = V_e$ и $a = d = |a_N|$.

5.Способ 2. Кубический сплайн

Альтернативный способ реализации ФБ MC_PositionProfile основан построении траектории движения электропривода на основе кубического сплайна. В этом способе предполагается, что центральный процессорный модуль ПЛК для управления электроприводом с заданной и достаточно высокой частотой ν выполняет отработку команд на переключение в режим работы PV с новыми значениями управляющих параметров V , a , d .

Для описания формул для вычисления коэффициентов кубического сплайна введем вспомогательные обозначения. Пусть

$$t_0 = 0, \quad t_i = \sum_{k=1}^i dT_k, \quad i = \overline{1, N}$$

Приблизим позицию электропривода на каждом из временных отрезков $[t_i, t_{i+1}]$, $i = \overline{0, N-1}$ при помощи следующих функций:

$$P_i(t) := A_i + B_i(t - t_i) + C_i(t - t_i)^2 + D_i(t - t_i)^3$$

Для кубического сплайна должен быть выполнен следующий набор условий:

$$\begin{aligned} P_0(t_0) &= p_0, \\ P_{i-1}(t_i) &= P_i(t_i) = p_i, \quad i = \overline{1, N-1}, \\ P_{N-1}(t_N) &= p_N \\ P'_i(t_{i+1}) &= P'_{i+1}(t_{i+1}), \quad i = \overline{0, N-2} \\ P''_i(t_{i+1}) &= P''_{i+1}(t_{i+1}), \quad i = \overline{0, N-2} \end{aligned}$$

Дополнительно введем обозначения для двух вспомогательных коэффициентов $A_N := P_{N-1}(t_N)$ и $C_N := P''_{N-1}(t_N)/2$.

Сведем задачу вычисления коэффициентов кубического сплайна к решению системы линейных уравнений относительно неизвестных C_i . Для этого сначала выразим все оставшиеся неизвестные A_i, B_i, D_i через C_i .

Из условий

$$\begin{aligned} P_i(t_i) &= p_i, \quad i = \overline{0, N-1} \\ A_N &= P_{N-1}(t_N) \end{aligned}$$

автоматически получаем

$$A_i = p_i, \quad i = \overline{0, N}$$

Из условия

$$P_i''(t_{i+1}) = P_{i+1}''(t_{i+1}), \quad i = \overline{0, N-2}$$

получим

$$D_i = \frac{C_{i+1} - C_i}{3 dT_{i+1}}, \quad i = \overline{0, N-2}$$

Из условия

$$P_i(t_{i+1}) = P_{i+1}(t_{i+1}), \quad i = \overline{0, N-2}$$

получим

$$B_i = \frac{A_{i+1} - A_i}{dT_{i+1}} - \frac{dT_{i+1}}{3} (C_{i+1} + 2 C_i), \\ i = \overline{0, N-2}$$

Подставим полученные выражения для D_i и B_i в условие

$$P_i'(t_{i+1}) = P_{i+1}'(t_{i+1}), \quad i = \overline{0, N-2}$$

и сгруппируем слагаемые при одинаковых C_i .

В результате получим следующую систему линейных уравнений:

$$\frac{dT_{i+1}}{3} C_i + \frac{2}{3} (dT_{i+1} + dT_{i+2}) C_{i+1} + \frac{dT_{i+2}}{3} C_{i+2} \\ = \frac{A_{i+2} - A_{i+1}}{dT_{i+2}} - \frac{A_{i+1} - A_i}{dT_{i+1}}, \\ i = \overline{0, N-2}$$

Для замыкания системы уравнений необходимо добавить еще два линейных уравнения. Для их получения воспользуемся краевыми условиями: скорость электропривода в начальный момент времени должна быть равна V_s , а в конечный момент времени – равна V_e . В таком случае из условия

$$V_s = P_0(t_0) = B_0 = \frac{A_1 - A_0}{dT_1} - \frac{dT_1}{3} (C_1 + 2 C_0)$$

получается дополнительное уравнение

$$\frac{2}{3} dT_1 C_0 + \frac{1}{3} dT_1 C_1 = \frac{A_1 - A_0}{dT_1} - V_s$$

Далее получим аналогичное уравнение с использованием V_e . Из условий

$$P_{N-1}(t_N) = A_N$$

$$P_{N-1}'(t_N) = V_e$$

вытекает следующее тождество:

$$A_N - dT_N V_e = P_{N-1}(t_N) - dT_N P_{N-1}'(t_N) \\ = A_{N-1} - C_{N-1} dT_N^2 - 2D_{N-1} dT_N^3$$

Выразим из полученного тождества D_{N-1} :

$$D_{N-1} = -\frac{A_N - A_{N-1}}{2 dT_N^3} + \frac{V_e}{2 dT_N^2} - \frac{C_{N-1}}{2 dT_N}$$

Подставим D_{N-1} в условие

$$C_N = \frac{P_{N-1}''(t_N)}{2} = C_{N-1} + 3 dT_N D_{N-1}$$

В результате получится дополнительное уравнение

$$\frac{1}{3} dT_N C_{N-1} + \frac{2}{3} dT_N C_N = -\left(\frac{A_N - A_{N-1}}{dT_N} - V_e\right)$$

Таким образом, мы снова получили систему линейных уравнений с трехдиагональной матрицей для нахождения неизвестных значений коэффициентов C_i , $i = \overline{0, N}$. Для ее

решения также можно применить метод прогонки. Для получения функции сплайна остается подставить полученные в результате решения системы значения C_i в выражения для коэффициентов A_i, B_i, D_i из формул выше.

При управлении электроприводом на каждом из отрезков времени $[t_i, t_{i+1}]$, $i = \overline{0, N-1}$ скорость V , передаваемая в качестве параметра при отправке команды переключения в режим PV, каждый раз должна вычисляться в соответствии с функцией сплайна как $V = P_i'(t + 1/\nu)$, где t обозначает текущее время, а ν – частоту отправки команд. Соответствующие значения параметров a и d должны вычисляться как $a = d = |(V - V_{cur}) \nu|$, где V_{cur} – это текущее значение скорости электропривода в момент отправки новой команды.

Таким образом, алгоритм отправки команд электроприводу для реализации ФБ MC_PositionProfile при помощи кубического сплайна имеет следующий вид:

- при вызове экземпляра ФБ MC_PositionProfile выполняется расчет соответствующих ему коэффициентов сплайна A_i, B_i, C_i, D_i ;

- с заданной в настройках центрального процессорного модуля частотой ν выполняется отправка команды переключения электропривода в режим PV с новыми значениями управляющих параметров V, a, d , вычисляемыми в соответствии приведенными выше формулами.

Следует отметить, что в отличие от первого способа, при использовании кубического сплайна при обходе позиций p_i возникает погрешность, вызываемая тем, что в предлагаемом алгоритме скорость движения электропривода меняется не в точном соответствии со сплайном, а ступенчато. Поэтому перед применением данного способа необходимо предварительно оценить размер погрешности в зависимости от частоты ν и подобрать частоту ν таким образом, чтобы возникающая погрешность не влияла на выполнение технологического процесса.

6. Заключение

В работе рассмотрены подходы к реализации ФБ спецификации PLCopen для среды исполнения прикладного ПО для Багет-ПЛК1/2 на основе ОСРВ Багет 3.х.

Публикация выполнена в рамках государственного задания по проведению фундаментальных исследований по теме «Создание и реализация доверенных систем искусственного интеллекта, основанных на новых математических и алгоритмических методах, моделях быстрых вычислений,

реализуемых на отечественных вычислительных системах» (FNEF-2024-0001 этап 2025 года, 1023032100070-3-1.2.1).

An Approach to Implementing Functional Blocks of the PLCopen Specification

N. D. Baykov, A. N. Godunov

Abstract. This paper examines possible approaches to implementing functional blocks for a control library for electrical power drives that is being developed as a replacement for foreign software in automated process control systems.

Keywords: functional block, motion control library, APCS, PLC

Литература

1. IEC 61800:2021 Adjustable speed electrical power drive systems. International Electrotechnical Commission. 2021.
2. IEC 61131:2023 Programmable controllers. International Electrotechnical Commission. 2023.
3. PLCopen Technical Committee 2. PLCopen Motion Control – Function Blocks – Part 1 & 2. Version 2.0. PLCopen. 2021.
4. CiA 402:2024 Device profile for drives and motion control. CAN in Automation. 2024.
5. ПЛК «БАГЕТ-ПЛК1» Руководство по эксплуатации ЮКСУ.421457.002РЭ. URL: https://niisi.ru/БАГЕТ-ПЛК1_РЭ.pdf (дата обращения: 16.10.2025).
6. ПЛК «БАГЕТ-ПЛК2» Руководство по эксплуатации ЮКСУ.421457.003РЭ. URL: https://niisi.ru/РЭ_ПЛК2_изм1.pdf (дата обращения: 16.10.2025).
7. А.Н. Годунов, В.А. Солдатов. Операционные системы семейства Багет (сходства, отличия и перспективы). «Программирование», (2014), № 5, с. 68–76.
8. Beremiz project. URL: <https://beremiz.org> (дата обращения: 16.10.2025).
9. Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. Численные методы. М., Лаборатория знаний, 2023.