
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования



ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(национальный исследовательский университет)

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Якимов И.А.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы № 4

Программирование движений типа SPLINE

**по дисциплине
«Программирование роботов-манипуляторов»**

**Челябинск
2021**

Методические указания содержат основные положения по программированию сложных кривых траекторий промышленных роботов-манипуляторов на примере робота-манипулятора фирмы KUKA для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.04.06 «Мехатроника и робототехника».

Лабораторная работа №4 Программирование движений типа SPLINE

Цель работы: знакомство с видом перемещения с блоком SPLINE, настройка и особенности программирования гладких линий.

1. Теоретическая часть

В этой лабораторной работе изучаются следующие элементы:

1. Работа с блоками SPLINE;
2. Программирование блоков SPLINE с помощью встроенного формуляра.

1.1. Работа с блоками SPLINE. Концепция

На самом деле программирование роботов, конечно же, не ограничивается простыми линейными и круговыми перемещениями. Технологии производства и сложные детали требуют программирования так называемых сложных траекторий, то есть контуров, которые не просто можно реализовать в виде комбинации команд траектории.



Рис. 1.1. Движение по типу Spline

С большим трудом сложные траектории можно воспроизвести путем сглаживания отдельных перемещений. В этом случае, однако, точки должны программироваться за пределом траектории (эти точки могут быть также недоступны или находиться на детали). Кроме того, для каждой записи перемещения контур сглаживания должен адаптироваться путем продолжительного тестирования, чтобы получить точную траекторию. При определенных обстоятельствах абсолютно точная реализация очень сложной траектории со сглаженными командами отдельных записей вообще невозможна. При относительно простых контурах этот метод хоть и возможен, но при более сложных контурах его реализация затруднена, а из-за слишком больших временных затрат, прежде всего, неэкономична.

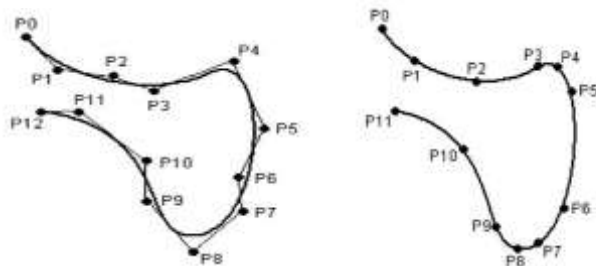


Рис. 1.2. Изогнутая траектория со сглаженными движениями LIN (левая) и изогнутая траектория с блоком Spline (правая)

Преимущества нового планирования траектории (блок SPLINE, SPTP, SLIN, SCIRC, SPL):

1. Траектория задается точками, которые лежат на траектории. Можно легко создать желаемую траекторию.
2. Запрограммированная скорость поддерживается лучше, чем при обычных видах движения. Снижение скорости происходит только в немногочисленных случаях. Кроме того, в блоках CP-Spline могут быть определены специальные постоянные диапазоны перемещений, временной блок, условный останов.
3. Ход траектории всегда одинаков, независимо от коррекции, скорости или ускорения.
4. Высокая точность выполнения круговых контуров и узких радиусов.

Новое планирование траектории означает планирование траектории с отдельными перемещениями Spline и Spline. Указанные здесь преимущества относятся к старому планированию траектории с командами перемещения PTP, LIN и CIRC.

1.2. Перемещение Spline

Самым разносторонним движением Spline является блок Spline. Блок Spline позволяет объединять несколько движений в одно общее движение. Блок Spline планируется и выполняется системой управления роботом как 1 запись движений.

Траектория проходит ровно через несколько точек

Spline (блок Spline) должен представлять собой траекторию процесса.

Движения, которые могут располагаться в блоке Spline, называются сегментами Spline. Их настройка выполняется по отдельности.

Блок CP-Spline может включать в себя сегменты SPL, SLIN и SCIRC (рис. 1.3).

```

SPLINE
SPL P1
SLIN P2
SPL P3
SCIRC P4 P5
SPL P6
ENDSPLINE

```

Рис. 1.3

Блок PTP-Spline должен содержать только сегменты SPTP.

```

PTP_SPLINE
SPTP P1
SPTP P2
SPTP P3
ENDSPLINE

```

Рис. 1.4

Кроме блоков Spline, существует возможность программирования отдельных движений Spline: SLIN, SCIRC и SPTP. Пример SLIN

```

SPLINE
SLIN P1
ENDSPLINE

```

```

SLIN P1

```

Рис. 1.5

Пример SPTP

```

PTP_SPLINE
SPTP P1
ENDSPLINE

```

```

SPTP P1

```

Рис. 1.6

ВНИМАНИЕ! Возможно сглаживание между всеми комбинациями блоков Spline и одиночными Spline.

1.2. Программирование блоков Spline с помощью встроенных формуляров

Дополнительно к отдельным записям с SPTP, SLIN, SCIRC и относительным перемещениям доступен «блок SPLINE».

Блок SPLINE рассматривается и планируется как отдельное перемещение со «сложной траекторией».

Имеются 2 вида блоков SPLINE:

Блок CP-SPLINE Spline с перемещениями CP (SPL, SLIN, SCIRC)

Блок PTP-SPLINE: Spline с перемещениями исключительно в осевой зоне (только SPTP)

Блок SPLINE – это запись перемещения с TOOL, BASE и IPO_MODE, но разными скоростями и ускорениями в отдельных сегментах.

Траектория планируется через все точки, таким образом, проход выполняется через все точки.

Полный расчет траектории выполняется предварительно. В результате известен весь ход траектории и она может быть оптимально размещена в результате планирования в рабочей зоне осей.

Траектории с очень узкими контурами всегда приводят к снижению скорости, поскольку оси робота являются ограничивающими элементами.

Внутри блока Spline сглаживания не требуется, поскольку через все. Дополнительно можно конфигурировать такие функции, как «постоянная скорость» и «фиксированное время».

Количество сегментов в блоке ограничено только объемом памяти.

Кроме сегментов перемещения блок Spline может содержать следующие элементы: встроенные команды из технологических пакетов, располагающие функциями Spline; комментарии и пустые строки.

Блок Spline не может содержать иных команд, например, команд распределения переменных или логических команд.

ВНИМАНИЕ! Начальная точка блока Spline является последней точкой перед блоком Spline. Целевая точка блока Spline является последней точкой в блоке Spline. Блок Spline не может инициировать останов предварительной процедуры.

1.3. Профиль скоростей движений Spline

Ход траектории всегда одинаков, независимо от коррекции, скорости или ускорения.

Система управления роботом уже при планировании учитывает физические границы робота.

Робот движется в рамках запрограммированной скорости с наибольшей возможной скоростью, допускаемой его физическими границами.

Это является преимуществом в сравнении с традиционными движениями LIN и CIRC, для которых физические границы при планировании не учитываются.

Эти границы начинают действовать лишь при выполнении движения, в определенных случаях вызывая останов системы.

К случаям, в которых требуется снижение скорости до значения ниже запрограммированного, относятся прежде всего: выраженные углы; значительная переориентация; значительные перемещения дополнительных осей; вблизи областей сингулярности.

ВНИМАНИЕ! Снижения скорости ввиду значительной переориентации можно избежать для сегментов Spline, выбрав контроль ориентации Без ориентации.

Снижение скорости до 0 происходит:

в следующих друг за другом точках с одинаковыми координатами; в следующих друг за другом сегментах SLIN и/или SCIRC. Причина: непостоянное направление вектора скорости.

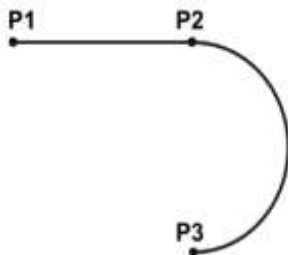


Рис. 1.7. Точный останов на P2

На переходах SLIN-SCIRC скорость также падает до 0, если прямая тангенциально переходит в окружность, поскольку окружность в отличие от прямых искривлена.

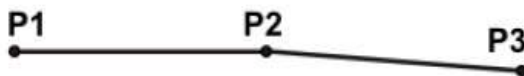


Рис. 1.8. Точный останов на P2

Исключения

1. Если сегменты SLIN следуют друг за другом, образуя прямую, и при этом ориентации сегментов равномерно меняются, то скорость не снижается.

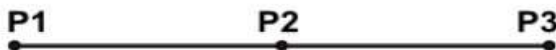


Рис. 1.9. Прохождение P2 без точного останова

2. На переходе SCIRC-SCIRC скорость не снижается, если оба круговых контура имеют один и тот же центр и одинаковый радиус, а также если ориентации равномерно меняются. (Трудно поддается обучению, поэтому следует рассчитывать и программировать точки).

ВНИМАНИЕ! Круговые контуры с одним и тем же центром и одинаковым радиусом иногда программируются для получения круговых контуров $\geq 360^\circ$. Более простой возможностью является программирование угла круга.

Снижение скорости в результате неравномерного программирования

1. При неравномерном распределении изменений ориентации/дополнительных осей относительно декартовой длины дуги зачастую возникает нежелательное снижение скорости. Пример неравномерного распределения:

```
;Начальная точка Spline
PTR {x 0, y 0, z 0, A 0, B 0, C 0}
SPLINE
; 0,1° Переориентация на 1 мм декарт. пути
SPL {x 0, y 100, z 0, A 10, B 0, C 0}
; 1° Переориентация на 1 мм декарт. пути
SPL {x 0, y 110, z 0, A 20, B 0, C 0}
; 0,055° Переориентация на 1 мм декарт. пути
SPL {x 0, y 310, z 0, A 31, B 0, C 0}
ENDSPLINE
```

Рис. 1.10

ВНИМАНИЕ! 1. Положение в декартовых координатах, ориентация и дополнительные оси привязаны друг к другу посредством геометрического планирования.

2. При прохождении на TCP вдоль декартовой касательной к траектории Spline ориентация и дополнительные оси также вращаются (в результате привязки) автоматически и наоборот (в частности, как правило, происходит полная интерполяция всех границ сегмента).

3. Многие нежелательные снижения декартовой скорости необходимы (обусловлены привязкой), чтобы следующие запрограммированные значения были соблюдены: рывки ориентации (\$JERK.ORI), ускорения ориентации (\$ACC.ORI1) и скорости ориентации (\$VEL.ORI1).

2. При неравномерном распределении путей ориентации по декартовому пути (длина дуги) зачастую ориентация должна быть ускорена или замедлена, что, как правило, связано с большими рывками ориентации.

2. В результате при неравномерном распределении пути чаще происходит снижение скорости, чем при равномерном (пропорциональном) распределении путей ориентации.

3. При сильном рывке может возникнуть вибрация робота и его руки.

Отключить контроль ориентации посредством встроенного формуляра или KRL.

```
$ORI_TYPE = #IGNORE
```

Пример равномерного распределения:


```

; Начальная точка Spline
PTP {x 0, y 0, z 0, A 0, B 0, C 0}
SPLINE
; 0,1° Переориентация на 1 мм декарт. пути
SPL {x 0, y 100, z 0, A 10, B 0, C 0}
; 0,1° Переориентация на 1 мм декарт. пути
SPL {x 0, y 110, z 0, A 11, B 0, C 0}
; 0,1° Переориентация на 1 мм декарт. пути
SPL {x 0, y 310, z 0, A 31, B 0, C 0}
ENDSPLINE

```

С запрограммированной ориентацией

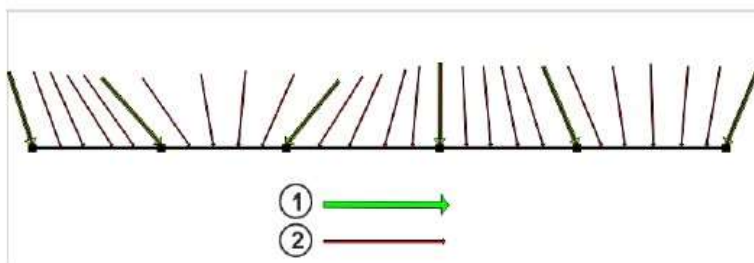


Рис. 1.11. С запрограммированной ориентацией: 1 - Запрограммированное положение с соответствующей ориентацией; 2 - интерполированное положение

Без запрограммированной ориентации

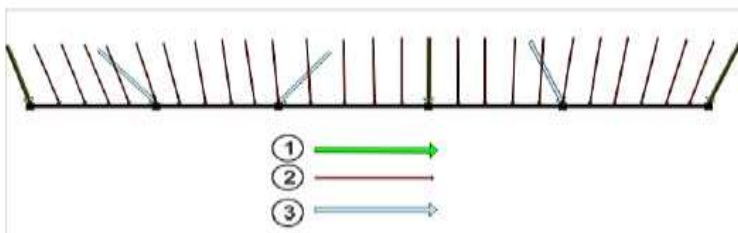


Рис. 1.12. Без запрограммированной ориентации: 1 - Запрограммированное положение с соответствующей ориентацией; 2 - интерполированное положение; 3 - запрограммированное положение с соответствующей ориентацией, ориентация которого не принимается

ВНИМАНИЕ!

Зачастую программируется ряд точек с относительно небольшим расстоянием. Но интерес представляет, в основном, декартова траектория (x, y, z). Однако Spline интерполирует и запрограммированную ориентацию, что может привести к снижению скорости. Поэтому в данном случае предпочтительно выбрать во встроенном формуляре IGNORE.

1.4. Изменения в блоках Spline

Изменение позиции точки:

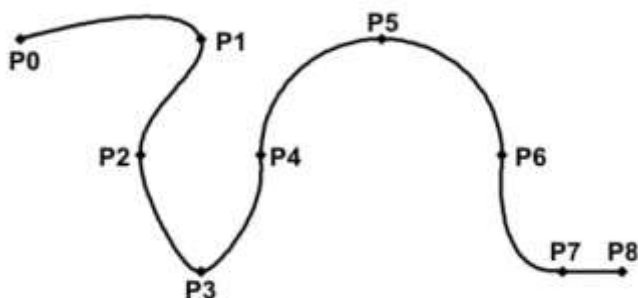
Если внутри блока Spline смещается точка, траектория изменяется максимум в 2 сегментах до этой точки и в 2 сегментах после нее.

Малые сдвиги точек, как правило, не приводят к изменению траектории. Однако, при следовании друг за другом очень длинных и очень коротких сегментов незначительные изменения могут иметь очень серьезное действие.

Изменение типа сегмента:

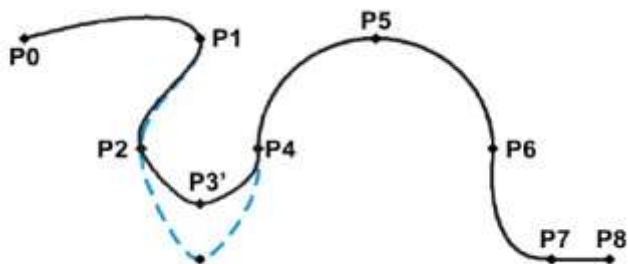
Если сегмент SPL заменяется сегментом SLIN или наоборот, траектория изменяется в предшествующем и в последующем сегментах.

Пример 1. Исходная траектория

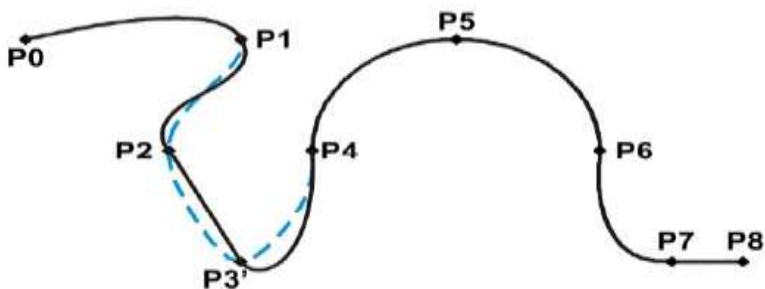


```
PTP P0
SPLINE
  SPL P1
  SPL P2
  SPL P3
  SPL P4
  SCIRC P5, P6
  SPL P7
  SLIN P8
ENDSPLINE
```

В сравнении с исходной траекторией смещается одна точка: Смещается P3. В связи с этим изменяется траектория в сегментах P1 - P2, P2 - P3 и P3 - P4. Сегмент P4 - P5 в этом случае не изменяется, так как он относится к SCIRC и определяет круговую траекторию.

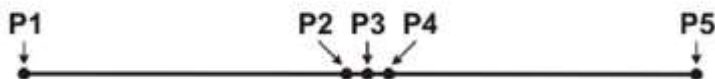


В сравнении с исходной траекторией изменяется тип сегмента: В исходной траектории изменен тип сегмента P2 - P3 с SPL на SLIN. Изменяется траектория в сегментах P1 - P2, P2 - P3 и P3 - P4.



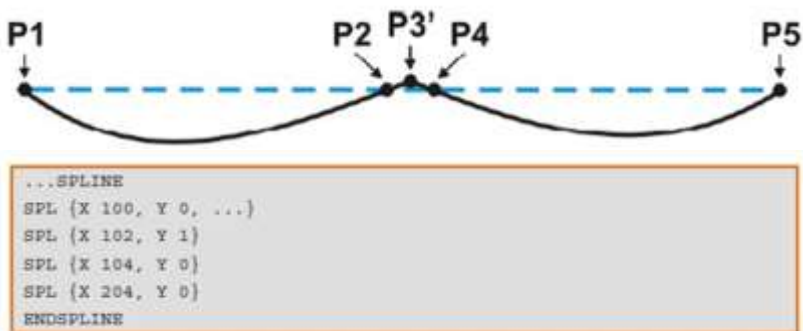
```
PTP P0
SPLINE
  SPL P1
  SPL P2
  SLIN P3
  SPL P4
  SCIRC P5, P6
  SPL P7
  SLIN P8
ENDSPLINE
```

Пример 2. Исходная траектория:



```
...
SPLINE SPL {X 100, Y 0, ...}
  SPL {X 102, Y 0}
  SPL {X 104, Y 0}
  SPL {X 204, Y 0}ENDSPLINE
```

В сравнении с исходной траекторией смещается одна точка:



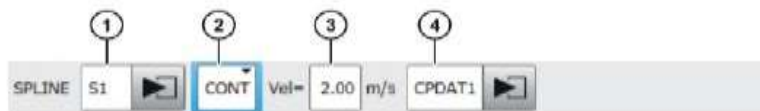
Смещается P3.

В связи с этим изменяется траектория во всех показанных сегментах.

Так как сегменты P2 - P3 и P3 - P4 являются очень короткими, а сегменты P1 - P2 и P4 - P5 очень длинными, небольшое смещение приводит к сильному изменению траектории. Способ устранения: расстояние между точками распределить более равномерно; прямые (за исключением очень коротких прямых) программировать как сегменты SLIN.

1.5. Программирование блоков CP-SPLINE с помощью встроенных формуляров

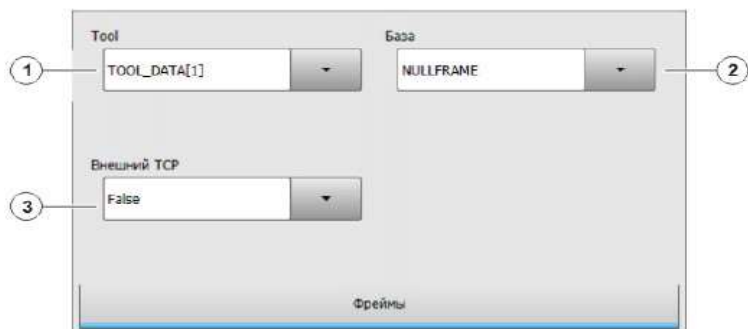
Блок CP-SPLINE



Встроенный формуляр блока CP-Spline: 1 - Имя блока Spline; 2 - CONT: сглаживание целевой точки; 3 - Декартова скорость; 4 - Имя записи данных перемещения

Система автоматически задает имя. Имя может быть перезаписано. Для редактирования данных перемещения коснуться стрелки. Откроется соответствующее окно опции. Если второй параметр CONT [пусто] выполняется точный подвод в целевую точку. Декартова скорость принимает диапазон от 0,0012 м/с.

Имя записи данных перемещения. Система автоматически задает имя. Имя может быть перезаписано. Для редактирования данных перемещения коснуться стрелки. Откроется соответствующее окно опции.



Окно опции Фреймы (блок CP- и PTP-Spline)

Поз. Описание

1. Выбрать инструмент.

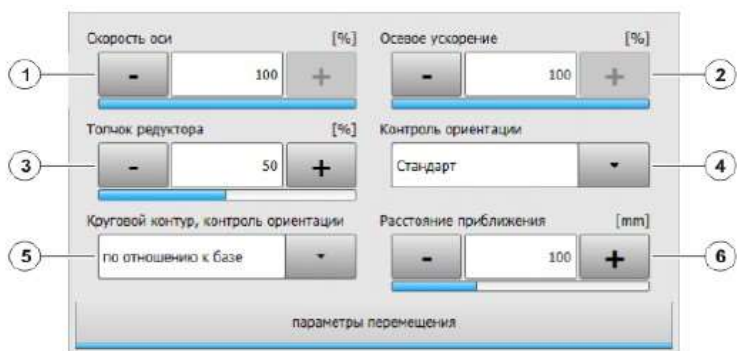
Или: Если отображается True в поле Внешний TCP: выбрать инструмент: [1]...[16]

2. Выбрать базу.

Или: Если отображается True в поле Внешний TCP: выбрать стационарный инструмент: [1] ... [32]

3. Режим интерполяции:

False: инструмент смонтирован на установочном фланце. True: инструмент является стационарным.

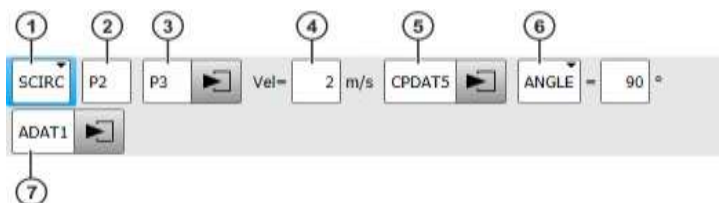


Окно опции Параметры перемещения (блок CP-Spline)

Таблица 1. Описание окна Параметры перемещения

Позиция	Описание
1	Скорость оси. Это значение соотносится с указанным в технических данных максимальным значением. 1 ... 100 %
2	Осевое ускорение. Это значение соотносится с указанным в технических данных максимальным значением. 1 ... 100 %
3	Рывок редуктора. Рывок (толчок) означает изменение ускорения. Это значение соотносится с указанным в технических данных максимальным значением. 1 ... 100 %
4	Выбрать контроль ориентации:
5	Выбрать базовую систему контроля ориентации: Данный параметр влияет только на сегменты SCIRC (при наличии)
6	Это поле отображается только при условии, что во встроенном формуляре была выбрана опция CONT. Расстояние до целевой точки, на которой сглаживание начинается раньше всего. Расстояние может быть максимально равно последнему сегменту в Spline. Если имеется только один сегмент, расстояние может составлять не более половины длины сегмента. Если здесь будет введено большее значение оно игнорируется, и используется максимальное значение.

Программирование в блоке CP-SPLINE



Встроенный формуляр Сегмент CP-Spline

По умолчанию отображаются не все поля встроенного формуляра. Для включения и исключения индикации полей предусмотрена кнопка Смена параметра.

Позиция	Описание
1	Вид перемещения SPL, SLIN или SCIRC
2	Только для SCIRC: Имя вспомогательной точки Система автоматически задает имя. Имя может быть перезаписано.
3	Имя целевой точки. Система автоматически задает имя. Имя может быть перезаписано. Для редактирования данных точки коснуться стрелки. Откроется соответствующее окно опции.
4	Декартова скорость По умолчанию для сегмента действует значение блока Spline. При необходимости здесь можно присвоить сегменту особое значение. Оно будет действовать только для данного сегмента. 0,001-2 м/с
5	Имя записи данных перемещения. Система автоматически задает имя. Имя может быть перезаписано. По умолчанию для сегмента действует значение блока Spline. При необходимости здесь можно присвоить сегменту особые значения. Они будут действовать только для данного сегмента. Для редактирования данных коснуться стрелки. Откроется соответствующее окно опции.
6	Угол круга Доступно только в том случае, если был выбран вид перемещения SCIRC. - 9 999° ... + 9 999°

	Если задается значение меньше -400° или больше $+400^{\circ}$, то при сохранении встроенного формуляра появляется запрос на подтверждение или отклонение введенного значения.
7	Имя записи данных с логическими параметрами. Система автоматически задает имя. Имя может быть перезаписано. Для редактирования данных коснуться стрелки. Откроется соответствующее окно опции.

Программирование блоков PTP-SPLINE с помощью встроенных формуляров выполняется аналогично описанному выше блоку.

2. Практическая часть

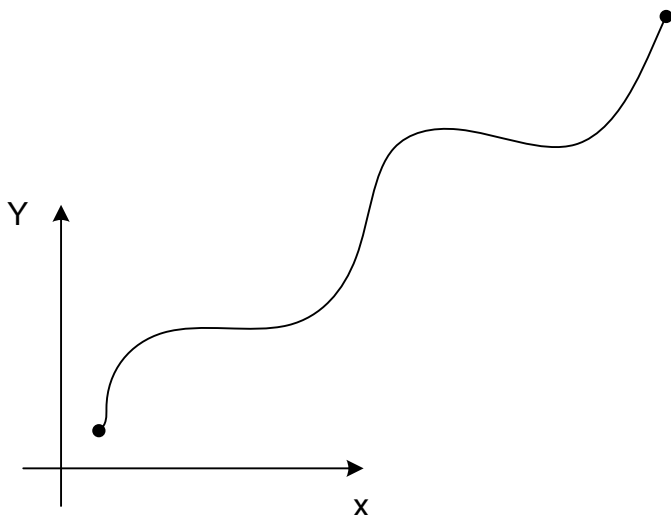
Указания по технике безопасности: Вы должны перед работой протестировать каждую программу. Тестирование программы всегда выполняется одинаково:

T1 Протестируйте свою программу в режиме T1 со скоростью до 100 %.

T2 Протестируйте свою программу в режиме T2 поэтапно до максимальной скорости, указанной преподавателем (% или м/с). Скорость увеличивайте всегда с небольшими приращениями, так как траектория может меняться в зависимости от скорости.

AUT Теперь вы можете использовать свою программу в режиме AUT до протестированной максимальной скорости.

Задача 1



1. Закрепить штифт в захвате.
2. Закрепите бланк в соответствующем зажимном приспособлении.
3. Создайте программу Paper_Spline_().
4. Запрограммируйте робота так, чтобы штифт перемещался по заданной траектории. Сначала ориентацию захвата не нужно принимать во внимание.
5. Протестируйте свою программу.

Задача 2



Проволочный контур Spline

1. Закрепите проушину в захвате.
2. Создайте новую программу Wire_Spline ().
3. Запрограммируйте робота так, чтобы проушина перемещалась по проволочному контуру Spline. В данном случае направление ориентации должно учитываться в каждой точке, чтобы избежать столкновения. Чтобы реализовать поворот на 360° , может потребоваться втягивание в проволочный контур с уже ввинченным инструментом.
4. Протестируйте свою программу.

Контрольные вопросы

1. Какая проблема возникает во время программирования сложных траекторий со сглаженными командами отдельных записей?
2. Как программируется блок SPLINE и обрабатывается системой управления?
3. Когда в блоках SPLINE снижается скорость?
4. Когда скорость снижается вплоть до 0?