

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАЕКТОРИЙ ТИПА «ПЕТЛЯ» ПРИ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Каневский Григорий Наумович,

к.т.н., доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроения»

Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е.

Алексеева, 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

Кочетов Игорь Олегович,

магистрант того же университета

Рассмотрены различные варианты траекторий при фрезерной обработке на станках с ЧПУ. Представлены математические зависимости для расчетной оценки производительности в зависимости от параметров движения: скорости, ускорения, длины кадра. Подробно исследована производительность, характерная для высокоскоростной обработки с использованием траекторий типа «петля». Получены рациональные значения параметров движения и, на основе этого, рекомендации технологам и наладчикам фрезерных станков с ЧПУ.

Ключевые слова: система ЧПУ, траектория, петля, высокоскоростная обработка, производительность, закон разгона-торможения.

SOME ASPECTS OF THE EFFECTIVENESS OF THE TRAJECTORIES TYPE "LOOP" IN MILLING

Objective: Research of high-speed milling performance with "loop" trajectories"

Methods: Calculations by mathematical model of productivity. This took into account the laws of acceleration and braking.

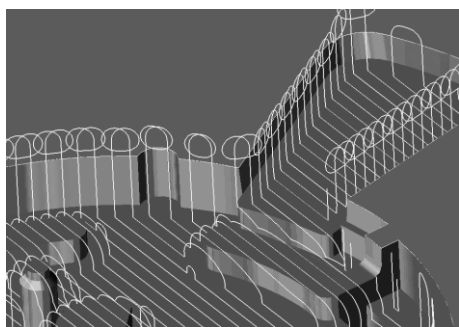
Research results: For the first time the rational parameters of the feed drive motion are obtained. The results of the expediency of using the trajectories of the "loop" type are obtained".

Keywords: CNC system, trajectory, loop, high-speed processing, performance, law of acceleration-braking.

Одной из современных тенденций повышения эффективности металлообработки является реализация принципов высокопроизводительной обработки (НРМ), при которой скорости подачи равны не сотням, а тысячам и десяткам тысяч мм/мин. Возможность выполнения высокопроизводительной обработки зависит от функционирования всей системы, взаимодействия процесса резания, работы инструмента, динамических характеристик приводов, компоновкой станка, параметров и функций системы управления. При этом разработчиками уделяется много внимания созданию конструкций станков, режущего инструмента, обеспечивающих высокопроизводительную обработку. Что же касается систем управления, то они могут ограничивать скорости подачи по сравнению с заданной технологом до 2-х и более раз. Так, в [1] показано, что законы разгона-торможения, характерные для большинства систем ЧПУ, не позволяют обеспечить современные требования высокопроизводительной обработки.

Одним из путей повышения производительности обработки на станках с ЧПУ при высокопроизводительной обработке, особенно сложных и точных поверхностей – уменьшение времени разгона-торможения. Однако реализация этого пути сопряжена с ограничивающими факторами, связанными с тем, что уменьшение времени разгона-торможения требует увеличения ускорений привода и, как следствие, приводит к значительному росту инерционных нагрузок на привод.

В связи с этим в последние годы начали развиваться технологические



приемы повышения производительности, исключая этапы разгона – торможения [2]. В частности, рекомендуется применять петли самого разного типа (рис.1). Данные рекомендации стали довольно популярными и вошли в качестве стратегий выбора траектории

Рисунок. 1. Пример петель «уход вверх»

движений в ряд САМ-систем. Например, САД/САМ-система Cimatron в своем арсенале имеет различные варианты петель [3].

Однако до сих пор отсутствует подробный анализ эффективности применения петель. В данной статье сделана попытка провести количественный анализ эффективности применения петель с точки зрения производительности.

На первом этапе для понимания основных закономерностей влияния траектории и ее параметров на производительность рассмотрим простую прямолинейную траекторию по одной координате. В таком варианте величина перемещения чаще всего есть длина кадра управляющей программы. Общее время перемещения на участке одного кадра суммируется из времени разгона t_p , равномерного движения $t_{\text{равн}}$ со скоростью подачи и времени торможения t_t (рис.2):



Рисунок 2. Прямой участок

Время и путь разгона-торможения зависят от закона неравномерного движения. В данной работе использован трапецеидальный закон изменения скорости от времени, как наиболее часто заложенный в системы ЧПУ (рис. 3а). Данный закон может быть реализован в двух вариантах: виде трапеции или в виде треугольника (рис. 3б). Последний вариант характерен для высоких скоростей подач (равномерного движения) и/или коротких кадров. При этом, чтобы остановиться точно в конце кадра, система ЧПУ на основе заложенного закона разгона-торможения должна рассчитать точку начала торможения в кадре и, тогда, может получиться ситуация, когда система не обеспечит выход на заданную скорость равномерного движения. Знание этого факта для технолога при высокоскоростном резании чистовой обработке сложных поверхностей, когда длина кадра составляет меньше 1 мм, является очень важным, т.к. фактическая производительность может быть значительно меньше рассчитанной по назначенной скорости подачи.

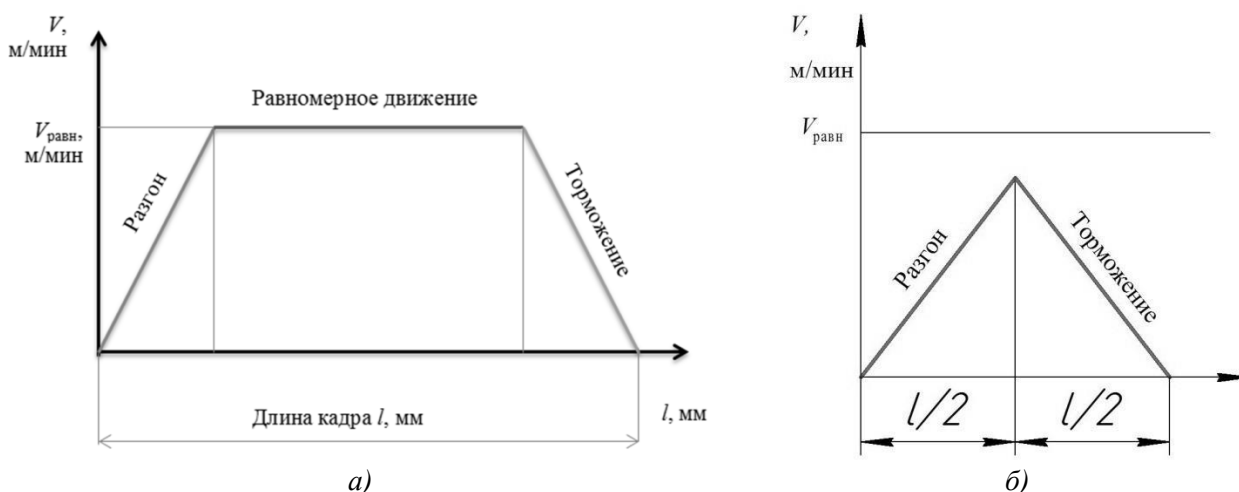


Рисунок 3. Закон трапецидального разгона-торможения:
 а – с выходом на скорость равномерного движения (подачи); б – необходимая скорость подачи не достигается.

Разработаны зависимости для расчета общего времени t_0 .

$$t_0 = t_p + t_T + t_{равн}, \text{сек} \quad (1)$$

Время разгона и торможения определяются по формулам:

$$t_p = V/(60 \cdot a), \text{сек} \quad (2)$$

$$t_T = V/(60 \cdot a), \text{сек} \quad (3)$$

Путь, который преодолевает узел станка во время разгона и торможения:

$$l_p = ((a \cdot t_p^2)/2) \cdot 1000, \text{мм} \quad (4)$$

$$l_T = ((a \cdot t_T^2)/2) \cdot 1000, \text{мм} \quad (5)$$

где l_p – длина разгона, мм, l_T – длина торможения, мм.

Длина и время на участке равномерного движения, при котором инструмент движется с постоянной скоростью, определяются:

$$l_{равн} = l - (l_p + l_T), \text{мм} \quad (6)$$

$$t_{равн} = (l_{равн}/1000)/V, \text{сек} \quad (7)$$

Вид закона разгона-торможения рассчитывается автоматически в зависимости от исходных параметров: a – ускорение привода, $\text{м}/\text{с}^2$, V – скорость подачи, заданная технологом, $\text{м}/\text{мин}$; l – длина прямолинейного участка (длина кадра), мм.

Исследование проводилось в широком диапазоне изменения параметров: $a = (0.2 \dots 4) \text{ м}/\text{с}^2$, $V = (0.2 \dots 40) \text{ м}/\text{мин}$, $l = (1 \dots 300) \text{ мм}$. Некоторые типовые

графики зависимости времени от ускорения при различных значениях скоростей и длины кадра показаны на рис. 4. Отсутствие значений при малых ускорениях объясняется высокой скоростью подачи и малой длиной кадра, при этом приводе не хватает длины разгона для выхода на рабочую скорость подачи.

На основании полученных результатов и, как видно из графиков, можно сделать следующие выводы:

1. Время разгона-торможения гиперболически уменьшается с увеличением ускорения независимо от значений скоростей и длин кадров, что логично вытекает из трапецеидального закона.
2. По этой же причине доля времени и длины равномерного движения увеличивается с увеличением ускорения
3. Суммарное время движения также гиперболически уменьшается. При этом, при небольших значениях ускорений время уменьшается интенсивно, а начиная с некоторого значения ускорения – меняется мало. На основании этого можно выделить некоторую границу значения ускорения, превышение которой практически не влияет на производительность, но увеличивает инерционные нагрузки на привод станка.

4. В табл. 1 приведены граничные или рациональные значения ускорений, превышение которых дает незначительное увеличение производительности (в пределах 15-20)%. Как видно, эти значения несколько отличаются в зависимости от скоростей и мало различаются в зависимости от длин кадров.

Таблица 1

Рациональные значения ускорений

<i>V</i>	1 м/мин						5 м/мин						10 м/мин					
<i>l</i> , мм	1	20	40	100	150	300	1	20	40	100	150	300	1	20	40	100	150	300
<i>a</i> , м/с ²	2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,9	0,5	0,5	0,5	0,9	0	3	2	1	0,9	0,5
<i>V</i>	15 м/мин						20 м/мин						25 м/мин					
<i>l</i> , мм	1	20	40	100	150	300	1	20	40	100	150	300	1	20	40	100	150	300
<i>a</i> , м/с ²	0	3,5	3,5	2	2	1	0	0	3	2	2,5	1,5	0	0	0	2	2	2
<i>V</i> , м/с	30 м/мин						35 м/мин						40 м/мин					
<i>l</i> , мм	1	20	40	100	150	300	1	20	40	100	150	300	1	20	40	100	150	300
<i>a</i> , м/с ²	0	0	0	2,5	2,5	2,5	0	0	0	3,5	3,5	3,5	0	0	0	0	3	3

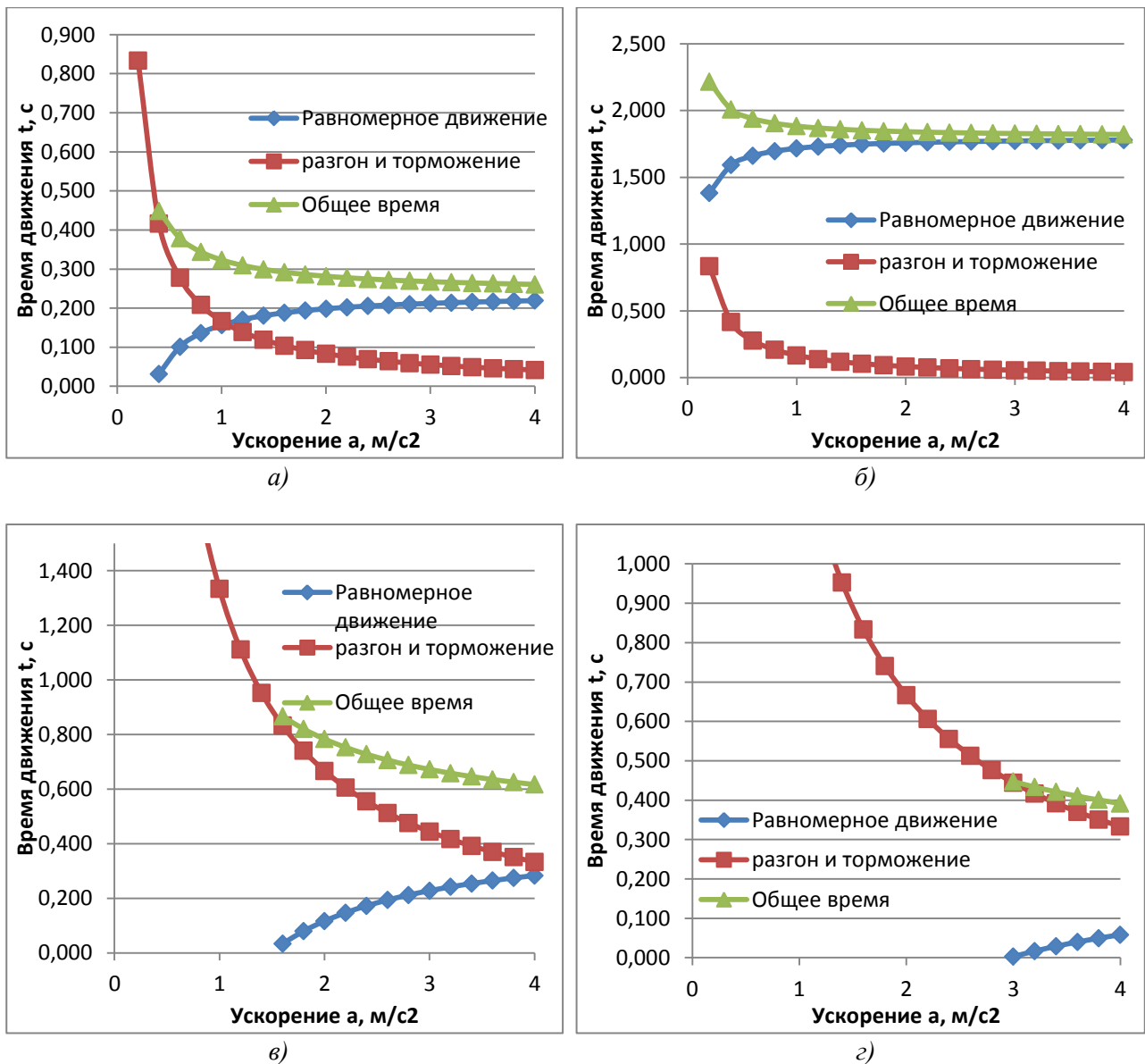


Рисунок 4. Типовые графики зависимости времени от ускорения при различных значениях скоростей и длины кадра:

а) при $V = 5 \text{ м/мин}, l = 20 \text{ мм}$; б) при $V = 5 \text{ м/мин}, l = 150 \text{ мм}$; в) при $V = 40 \text{ м/мин}, l = 150 \text{ мм}$; г) при $V = 0,67 \text{ м/с}, l = 300 \text{ мм}$

Таким образом, выявлены значения ускорений и получены рекомендации для проектировщиков станков и наладчиков по рациональному значению ускорений, превышение которых не имеет смысла, т.к. производительность почти не меняется, а инерционные нагрузки пропорционально растут.

При движении по более сложным траекториям принципиальной разницы не будет. Расчет усложняется только тем, что в работе участвуют одновременно несколько приводов с одинаковым законом разгона-торможения, и

результатирующие значения времени движения будут являться геометрической суммой времен каждого привода.

Рассмотрим теперь технологическую особенность высокопроизводительной обработки – замену промежуточных участков разгона-торможения на участок равномерного движения с максимальной скоростью по траектории типа «петля». Такие траектории характерны при резкой смене координатного направления движения, при котором требуется резкий перепад скоростей. Аналогично рассмотрим простую траекторию – две прямых траекторий последовательно по каждой координате (рис. 5).

Цикл движения будет выглядеть так: разгон по первой координате, равномерное движение по первой координате плюс по петле с такой же скоростью, равномерное движение по второй координате с той же скоростью, торможение. К исходным параметрам, характеризующим движение по траектории, кроме перечисленных выше, добавляется радиус петли.

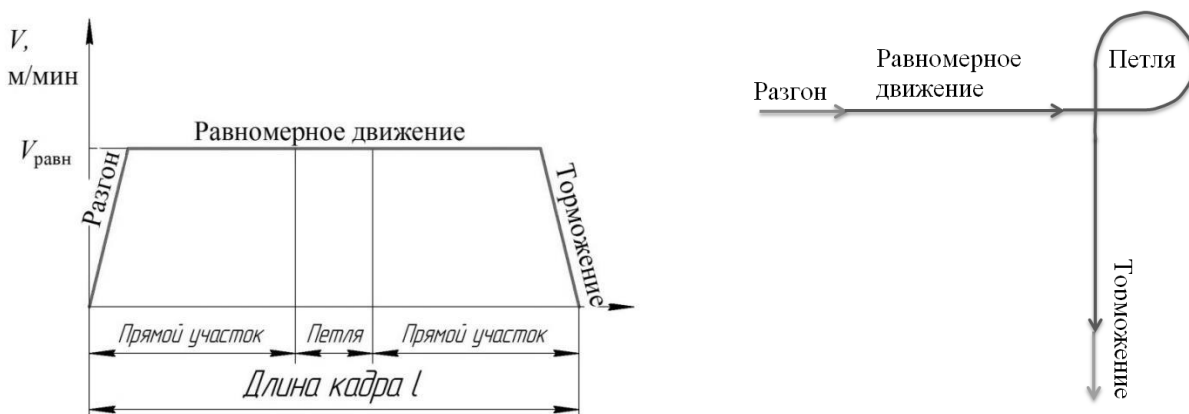


Рисунок 5. Участок с петлей

Время движения с петлей будет определяться по формуле:

$$t_{рп} = t_p + t_{рп} + t_T, \text{ сек}, \quad (8)$$

Время разгона и торможения рассчитываются по (2) – (3).

Длина прохождения равномерного движения $l_{равн}$, определяется:

$$l_{п} = 2 \cdot \pi \cdot r_{п}, \text{ мм}, \quad (9)$$

где $r_{п}$ – радиус петли, мм

Тогда полная длина равномерного движения с петлей будет равна:

$$l_{рп} = (2 \cdot l + l_{п}) - (l_p + l_T), \text{ мм} \quad (10)$$

где l_p и l_T – длина разгона и торможения соответственно, определяемые по (4) – (5).

Время прохождения участка с петлей с постоянной скоростью:

$$t_{pp} = l_{pp}/V, \text{сек} \quad (11)$$

Расчетное исследование проводилось аналогично предыдущему, значения параметров варьировались в тех же пределах, радиус петли – от 7.5 до 35 мм. Некоторые типовые графики зависимости времени от ускорения применительно к высокоскоростной обработки приведены на рис. 6.

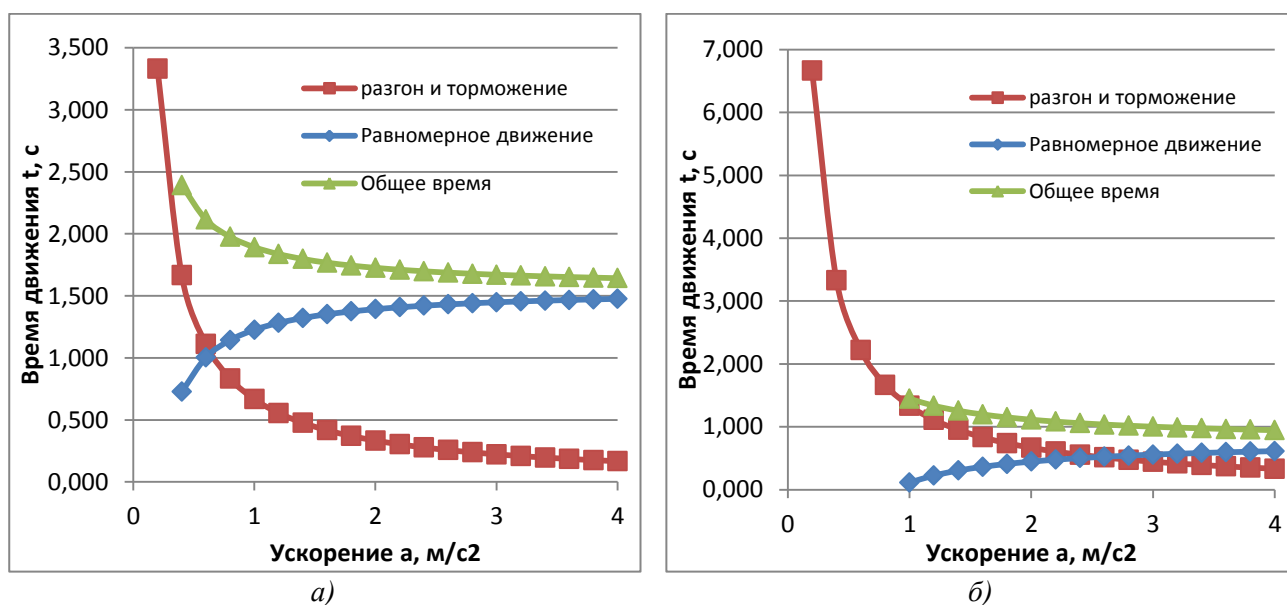


Рисунок 6. Типовые графики зависимости времени от ускорения при радиусе петли 35 мм:

а) $V = 20$ м/мин, $l = 150$ мм; б) $V = 40$ м/мин, $l = 150$ мм

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Характер изменения производительности в зависимости от ускорения аналогичен движению без петли.
2. Аналогично, можно выделить некоторую границу значения ускорения, превышение которой практически не влияет на производительность, но увеличивает инерционные нагрузки на привод станка.
3. При этом, граничное значение ускорения мало зависит не только от скорости и длины кадра, но и от радиуса или длины петли

4. В табл. 2 приведены граничные или рациональные значения ускорений, превышение которых дает незначительное увеличение производительности (в пределах 15-20)%. Как видно, эти значения несколько отличаются в зависимости от скоростей и мало различаются в зависимости от длин кадров.

Таблица 2
Рациональные значения ускорения для участка с петлей и без петли

V , м/мин	5 м/мин											
Длина рабочего хода l , мм	20				150				300			
Радиус петли r_n , мм	7,5	10	25	35	7,5	10	25	35	7,5	10	25	35
Рациональное значение ускорения без петли a , м/с ²	2				0,5				0,5			
Рациональное значение ускорения с петлей a , м/с ²	2	1,5	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
V , м/мин	20 м/мин											
Длина рабочего хода l , мм	20				150				300			
Радиус петли r_n , мм	7,5	10	25	35	7,5	10	25	35	7,5	10	25	35
Рациональное значение ускорения без петли a , м/с ²	0				2				2			
Рациональное значение ускорения с петлей a , м/с ²	2	2	2	2	1,5	1	1	1	1,5	1,5	1	1
V , м/мин	30 м/мин											
Длина рабочего хода l , мм	20				150				300			
Радиус петли r_n , мм	7,5	10	25	35	7,5	10	25	35	7,5	10	25	35
Рациональное значение ускорения без петли a , м/с ²	0				2				2			
Рациональное значение ускорения с петлей a , м/с ²	3	3	2	2	2	2	2	2	1,5	1,5	1,5	1,5
V , м/мин	40 м/мин											
Длина рабочего хода l , мм	20				150				300			
Радиус петли r_n , мм	7,5	10	25	35	7,5	10	25	35	7,5	10	25	35
Рациональное значение ускорения без петли a , м/с ²	0				3				2			
Рациональное значение ускорения с петлей a , м/с ²	0	0	2,5	2,5	2	2	2	2	2	2	2	2

Особый интерес представляет оценка эффективности использования петель. На первый взгляд создается впечатление, что использование петли увеличивает общую длину движения и, тем самым, время движения. Но, с другой стороны, в два раза сокращается время на разгон и торможение. Поэтому, при малых значениях ускорений и в зависимости от длины

перемещения и скорости доля разгона-торможения в общем времени движения может быть большой и сокращение этой доли может привести к уменьшению общего времени. Для проверки этого факта проведены расчеты времени в указанном выше диапазоне значений параметров.

На рис. 7 приведены сравнительные кривые времени без петли и с петлей при некоторых значениях скорости и длины. Как видно, существует значение ускорения, которое определяет границу эффективности применения петли с точки зрения производительности (табл. 2).

В целом, на основании табл. 2 можно сформулировать ориентировочную рекомендацию: независимо от скорости подачи, длины кадров (перемещений) и радиусов петли рациональные значения ускорений не превышают $(2-2,5) \text{ м/с}^2$, увеличение значений ускорения приводов практически не приводит к увеличению производительности, но увеличивает инерционные нагрузки.

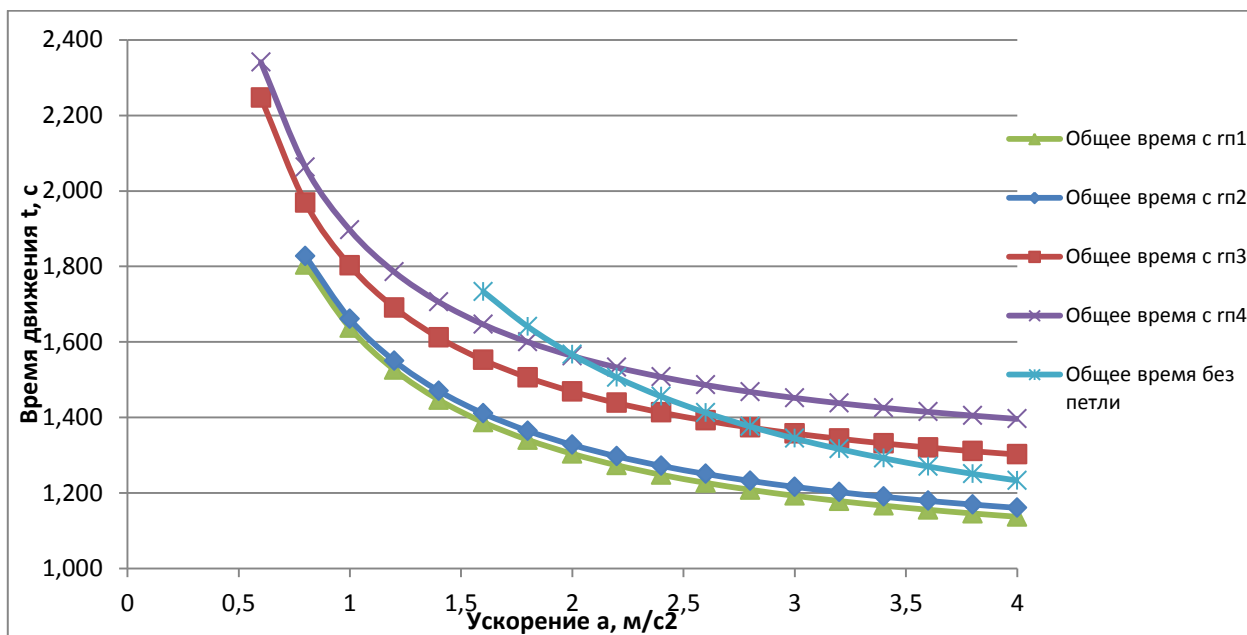


Рис. 7. Общее время движения при различных значениях радиуса петли и движения без петли при $V = 40 \text{ м/мин}$, $l = 300$

Выводы. Разработаны математические зависимости и алгоритм расчета времени движения привода подач фрезерного станка с учетом закона разгона-торможения в каждом кадре. Данный алгоритм позволит технологу до назначения режима резания оценить реальную производительность, которая может быть значительно ниже, чем теоретическая, рассчитанная только на

основе постоянной скорости подачи без учета разгона и торможения привода подачи. Кроме того, при высокоскоростной обработке такой расчет покажет, сможет ли станок выйти на заданную скорость подачи или начнет торможение, не достигнув требуемой скорости и, тем самым, реально будет работать на пониженном режиме резания.

Получены рекомендации по рациональным значениям ускорений привода. Превышение этих значений практически не приводит к увеличению производительности. Поэтому, стремление производителей станков или наладчиков обеспечить более высокие ускорения на станке не совсем верное. Это может быть оправданным при небольших значениях ускорений. При увеличении ускорения производительность почти не изменится, но зато будет увеличиваться инерционная нагрузка на станок.

Использование петли имеет смысл с точки зрения уменьшения инерционных нагрузок, частоты и направления их воздействия. При небольших значениях ускорения (до 2 м/с^2), как видно из рис. 7, при высокоскоростной обработке использование петли также желательно, т.к. обеспечивают более высокую производительность.

Литература

1. **Панышев, Н.Н., Каневский, Г.Н.** Особенности систем управления металлообрабатывающим оборудованием в производстве формообразующей оснастки «Опыт. Сборник статей. Спец. приложение к журналу «РИТМ», №1, май 2007.

2. **Зимин, М.Н., Каневский, Г.Н., Панышев, Н.Н., Ялымов, Д.А.** Пути повышения производительности станков с ЧПУ «Вестник машиностроения», 2004, с. 38-42.

3. **Би Питрон.** [Электронный ресурс]. – Российская Федерация: ГК "Би Питрон» сор. 2018. - Режим доступа: <http://beepitron.com/>.