

УДК 621.7/9:004.925.84

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-78-81

*А. С. Пронин, К. А. Драпак, В. С. Фомин***АНАЛИЗ АЛГОРИТМА INPUT SHAPING ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЕЧАТАЮЩЕЙ ГОЛОВКИ АДДИТИВНЫХ УСТАНОВОК
С ВСТРОЕННЫМ ПРОГРАММНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ KLIPPER*****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: app@vstu.ru, apronin03@mail.ru, loldra@yandex.ru

Vladfom2302@yandex.com

Проведен анализ функциональных возможностей и преимуществ Klipper – прошивки для 3D-принтеров с целью определения ее эффективности как программного решения для управления 3D-печатью. Представлены результаты изучения алгоритмов Klipper, таких как «look-ahead», «minimum cruise ratio» и «input shaping», которые повышают качество печати за счет уменьшения вибраций и более точного управления движением печатающей головки. Описана интегрированная система, включающая гибкие настройки и обеспечивающая высокую производительность, и алгоритмы оптимизации движения.

Ключевые слова: Klipper, 3D-печать, алгоритм, ПО, аддитивные технологии, Input Shaping

*A. S. Pronin, K. A. Drapak, V. S. Fomin***ANALYSING THE INPUT SHAPING ALGORITHM FOR IMPROVING
THE PRINthead MOVEMENT ACCURACY OF ADDITIVE
MANUFACTURING PLANTS WITH KLIPPER EMBEDDED SOFTWARE****Volgograd State Technical University**

The functionality and benefits of Klipper, a firmware for 3D printers, are analysed to determine its effectiveness as a software solution for 3D printing control. Klipper algorithms such as 'look-ahead', 'minimum cruise ratio' and 'input shaping', which improve print quality by reducing vibration and more accurately controlling print head movement, are analysed. An integrated system is described that includes flexible settings for high productivity and motion optimisation algorithms.

Keywords: Klipper, 3D printing, algorithm, software, additive technologies, Input Shaping

Аддитивные технологии, также известные как 3D-печать, представляют собой быстро развивающуюся область, которая предоставляет новые способы производства различных деталей и изделий. В основе этих технологий лежит послойное создание объектов на основе цифровых 3D-моделей, что позволяет производить изделия сложной геометрии, которые трудно или невозможно изготовить традиционными методами [1]. Развитие аддитивных технологий неразрывно связано с совершенствованием программного обеспечения, далее ПО, которое играет ключевую роль в каждом этапе процесса, от проектирования до производства.

Несмотря на стремительное развитие и усложнение ПО для аддитивных технологий, одним из ключевых аспектов его выбора остается обеспечение высокой точности печати. Влияние вибраций и инерции может приводить к различным геометрическим искажениям и снижению качества итогового изделия. В связи с этим современные производители ПО все

больше внимания начинают уделять алгоритмам, направленным на компенсацию этих негативных факторов. Использование современных алгоритмов 3D-печати позволяет минимизировать возможность появления всевозможных дефектов и неточностей, что несомненно отражается на конечном результате.

В современных реалиях, когда 3D-печать становится все более популярной, *Klipper* выделяется как один из наиболее инновационных вариантов программного обеспечения для управления 3D-принтерами. *Klipper* – это прошивка для 3D-принтеров, которая отличается своей гибкостью, высокой производительностью и возможностью тонкой настройки, при этом, предлагая относительно простой и понятный интерфейс пользователя [2].

Klipper представляет пользователю несколько очень полезных алгоритмов, такие как «look-ahead», «minimum cruise ratio» и «input shaping», которые, несомненно, упрощают работу с 3D-печатью. «Look-ahead», дословный

перевод которого звучит, как «предварительный просмотр» предназначен для оптимизации скоростей на поворотах при 3D-печати [3]. Он анализирует последовательные перемещения печатающей головки, оценивая углы между ними, чтобы минимизировать резкие изменения

скорости. Это позволяет избежать лишних замедлений и ускорений, которые увеличивают общее время печати и могут негативно сказаться на качестве изделия, а также обеспечивает точное и гибкое управление движением печатающей головки.



Рис. 1. Изменение скорости при повороте на угол 90 градусов с использованием «look-ahead»

Вторым немаловажным алгоритмом является «*minimum cruise ratio*», который дословно переводится, как «минимальный коэффициент крейсерской скорости». В системе *Klipper* реализован механизм, направленный на сглаживание движений при выполнении коротких «зигзагообразных» перемещений [3]. Его основная задача – снижение вибраций, возникающих в конструкции 3D-принтера, что уменьшает нагрузку на механические элементы и снижает уровень шума во время работы. Частые переходы от ускорения к замедлению могут вызывать нестабильность, поэтому алгоритм увеличивает долю пути, пройденного на крейсерской скорости, за счет снижения максимальной скорости некоторых перемещений. Это обеспечивает более плавное движение печатающей головки.

В дополнение к вышеописанным механизмам оптимизации работы 3D-принтеров, *Klipper* поддерживает алгоритм, известный как «*Input Shaping*». Данный алгоритм представляет собой метод управления открытым контуром, который генерирует управляющий сигнал, способный компенсировать собственные вибрации системы [4]. Для его успешного внедрения требуется провести определенные настройки и измерения, которые позволят адаптировать его к конкретной конфигурации принтера. В дополнение к снижению уровня «эхо», использование *Input Shaping* также способствует уменьшению вибраций и тряски принтера в целом [5]. Это может привести к улучшению надежности работы драйверов шаговых двигателей, что дополнительно повышает общую стабильность и эффективность печати.

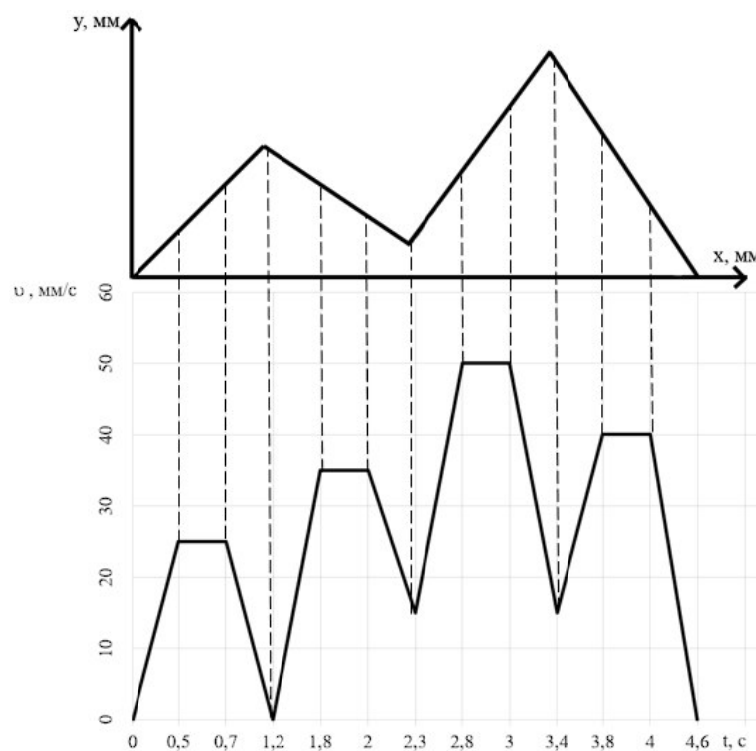


Рис. 2. Изменение скорости при зигзагообразном движении с «*minimum cruise ratio*»

В рамках исследования *Input Shaping* был проведен эксперимент, в ходе которого были напечатаны 3 идентичных тестовых образца, представленных на рисунке 3, с различными конфигурациями алгоритма. Образец под номером 1 был напечатан без использования *Input Shaping*, для того чтобы обеспечить контрольную точку для визуального сравнения. Образцы 2 и 3 были напечатаны с применением технологии *Input Shaping*, но образец под номером 3 был напечатан с базовыми настройками *Input Shaping*, а для печати второго образца была подобрана оптимальная конфигурация алгоритма.

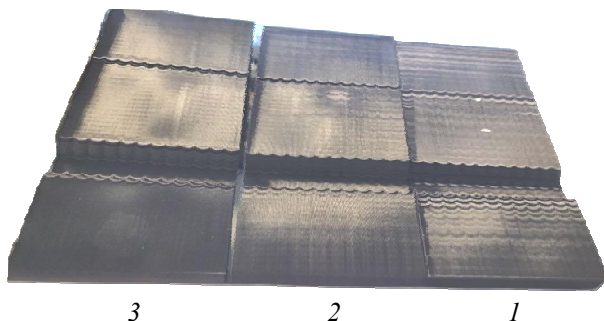


Рис. 3. Образцы, напечатанные в рамках исследования алгоритма *Input Shaping*

Визуальный анализ рисунка демонстрирует, что образцы, напечатанные с использованием

Input Shaping, обладают значительно более гладкой и ровной поверхностью, что наглядно свидетельствует об эффективном подавлении резонансных колебаний и, как следствие, уменьшении дефектов поверхности. При этом, дальнейшая оптимизация конфигурации алгоритма, включающая точную настройку параметров, позволила добиться еще большего улучшения качества, минимизируя возбуждение резонанса и максимально реализуя потенциал *Input Shaping*, что отражается в более равномерном и гладком виде тестового образца и подтверждает, что сочетание *Input Shaping* с точной настройкой параметров печати значительно повышает качество поверхности печатных изделий, обеспечивая не только улучшенный внешний вид, но и более точное соответствие заданным размерам и форме.

Таким образом, *Klipper* представляет собой мощное и удобное программное обеспечение для управления 3D-принтерами, сочетающее гибкость настройки с интуитивным интерфейсом. Алгоритмы «*look-ahead*» и «*minimum cruise ratio*» оптимизируют траектории движения печатающей головки, сокращая время печати за счет минимизации резких остановок и ускорений, что положительно сказывается на качестве изделий. Эксперимент, проведенный с *Input*

Shaping, показал, что использование этого алгоритма значительно улучшает качество поверхности печатаемых изделий, эффективно подавляя резонансные колебания и уменьшая дефекты. Сочетание *Input Shaping* с точной настройкой параметров печати позволяет добиться еще большего улучшения качества, обеспечивая не только улучшенный внешний вид, но и более точное соответствие заданным размерам и форме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чудинский, Р. М. Роль и место аддитивных технологий в образовательном процессе/ [Электронный ресурс] / Р. М. Чудинский, Н. А. Горбунов // Современные пробле-

мы науки и образования: [сайт]. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=32065> (дата обращения: 07.02.2025).

2. Top3DShop / [Электронный ресурс] // Обзор прошивки Klipper для 3D-принтеров: [сайт]. – URL: <https://top3dshop.ru/blog/obzor-proshivki-klipper> (дата обращения: 07.02.2025)

3. Klipper documentation / [Электронный ресурс] // Kinematics: [сайт]. – URL: <https://www.klipper3d.org/Kinematics> (дата обращения: 05.02.2025).

4. Klipper Wiki / [Электронный ресурс] // Resonance Compensation: [сайт]. – URL: <https://klipper.wiki/ru/home/tuning/shaper/> (дата обращения: 05.02.2025).

5. Rec3D / [Электронный ресурс] // Как настроить функцию input shaping в Klipper: [сайт]. – URL: <https://rec3d.ru/rec-wiki/kak-nastroit-funktsiyu-input-shaping-v-klipper/> (дата обращения: 07.02.2025).