

УДК 654.071.3

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-3-298-74-77

А. П. Порхун, В. Г. Барабанов, В. С. Фомин, Е. А. Дьяченко

МЕТОД ГАШЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ FDM ПРИНТЕРА

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: sa.porkhun30@gmail.com, vbarabanov@vstu.ru,
vladfom2302@yandex.ru, zhenya.dyachenko.1999@gmail.com

В работе рассматривается исследование по теме резонансных частот при печати 3D-принтера, работающего по технологии моделирования методом послойного наплавления, и минимизация их влияния на качество продукции.

Ключевые слова: резонансные частоты, 3D-принтеры, послойное наплавление, Inputshaper

© Порхун А. П., Барабанов В. Г., Фомин В. С., Дьяченко Е. А., 2025.

A. P. Porkhun, V. G. Barabanov, V. S. Fomin, E. A. Dyachenko

FDM PRINTER RESONANCE FREQUENCY ATTENUATION METHOD

Volgograd State Technical University

The paper considers a study on the topic of resonant frequencies when printing a 3D printer using the technology of modeling the method of layer-by-layer deposition, and minimizing their impact on product quality.

Keywords: resonant frequencies, 3D printers, layer-by-layer surfacing, Inputshaper

Технология 3D-печати является одной из самых быстроразвивающихся и инновационных в современном обществе, охватывая множество сфер нашей жизни. Она уже стала достаточно популярной, и многие люди знакомы с ее возможностями или даже использовали ее на практике. Безусловно, 3D-печать предлагает множество преимуществ, таких как возможность создания сложных и индивидуализированных объектов и ускорение прототипирования. Однако, помимо всех положительных аспектов, необходимо учитывать и некоторые ограничения этой технологии. Одним из основных недостатков является относительно низкая скорость и проблема повторяемости печати. Особенно это может повлиять при производстве крупных или сложных деталей, для которых требуется значительное время на завершение процесса.

Для повышения скорости и повторяемости 3D-печати возможно использование более мощных двигателей и усиленной конструкции принтера. Кроме того, внедрение современных кинематических схем, таких как *Delta* и *Scara*, может значительно оптимизировать процесс печати (рис. 1). Эти методы включают применение двигателей с увеличенной мощностью и модификацию конструкции для повышения точности изготовления изделий.

Такие улучшения способствуют ускорению печати и повышению качества готовых изделий. Однако следует учитывать, что такие изменения могут привести к увеличению габаритов и стоимости принтеров, а также потребовать дополнительных затрат на разработку соответствующего программного и аппаратного обеспечения [1].

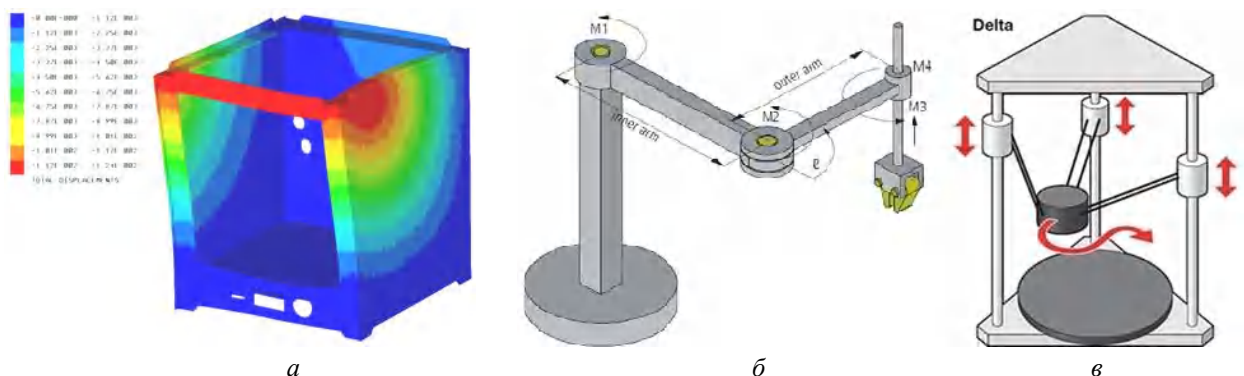


Рис. 1. Подходы увеличения скорости печати:
а – увеличение жесткости корпуса; б – Scara кинематика; в – Delta кинематика

Другим способом является метод *Inputshaper* (Компенсация резонанса). *Inputshaper* – это метод управления без обратной связи, который, разбивая одно цельное движение на несколько небольших, генерирует импульсы, гасящие собственные вибрации. Данный метод используется в нашем исследовании.

Алгоритм работы основан на перераспределении во времени силового воздействия на объект управления при сохранении неизменной величины суммарного воздействия. За счет относительного увеличения времени перехода системы из одного состояния в другое обеспе-

чивается компенсация возникающих колебаний, а сдвиг управляющего воздействия на полпериода (долю периода) вычисленных колебаний объекта управления обеспечивает в идеальном случае полное их подавление.

Суть *shaping*-алгоритмов заключается в формировании управляющего сигнала путем свертки задающего воздействия с последовательностью импульсов (дельта-функций Дирака) [3]. Амплитуды и интервал времени между этими импульсами влияют на степень подавления колебаний, длительность переходных процессов и диапазон частот колебаний, в котором алго-

ритм (фильтр) эффективен. *Shaping*-алгоритмы различаются используемыми последовательностями импульсов (методикой расчета амплитуд и интервалов времени между ними).

Чтобы гарантировать, что преобразованное *shaping*-фильтром входное воздействие приведет к такому же установившемуся значению, что и оригинальный задающий сигнал, в большинстве *shaping*-алгоритмов амплитуды импульсов принимаются такими, чтобы суммарное воздействие на систему осталось неизменным: $\sum_{i=1}^n A_i = 1$, где n – количество импульсов; A_i – амплитуда i -го импульса.

Один из главных видимых признаков, на который мы можем ориентироваться при оценке качества внешней поверхности детали является «эхо». Эхо – это дефект печати, при котором на ровных поверхностях появляются ореолы, рябь или звон, по форме повторяющие рядом находящийся угол или край отпечатка. Эхо возникает из-за механической вибрации принтера, вызываемой быстрой сменой направления движения печатной головки.

Мы предполагаем, что проблему эффекта-эхо, а следовательно, и прочностных характеристик на высоких скоростях печати, можно решить, применяя метод импульсного формирования (*Inputshaper*), без необходимости существенных изменений в конструкции устройства. Эта рабочая гипотеза основывается на предположении, что корректировка входного сигнала позволит контролировать и минимизировать нежелательные резонансные отклики.

Материальной базой исследования является: 3D-принтер «Voron 0.2R» – это 3D-принтер

из серии открытых проектов *Voron*, с кинематикой *Core XY*. Основные узлы – печатные, рама состоит из алюминиевых профилей;

модуль *EBB42* – это коммутационная плата экструдера. Соединение осуществляется через *CAN* или *USB*, что упрощает подключение кабелей к принтеру. Модуль был установлен на печатающей головке принтера и был подключен к основной плате через *USB*, на данной плате находится акселерометр *adxl345*.

Методика эксперимента:

- проведение теста с изменением ускорения перемещения печатающей головки с начальным значением 1500 мм/с^2 , с шагом 500 мм/с^2 на каждые 5 мм высоты напечатанного изделия;
- исследование поверхности на проявление дефекта “Эхо”, с фиксированием результатов;
- проведение тестов резонансов в автоматическом режиме с использованием датчика *adxl345*;
- применение подобранных значений в конфигурации принтера;
- проведение повторного теста (2) с последующим исследованием (3);
- определение итогов тестирования и проверки полученных результатов.

Конфигурационный файл прошивки, который содержит в себе секцию подключения платы *EBB42* по последовательному порту, секцию конфигурации датчика *ADXL345* подключенного по шине *SPI*, размещенного на плате *EBB42*, секцию конфигурации *INPUT_SHAPING*, секцию тестера резонансов, макросы для удобной работы с командами для исследования представлен на рис. 2.

```
[mcu EBB42]
serial:/dev/serial/by-id/usb-klipper_stm32g0b1xx_190844080E50425539393020-1f08

[adxl345]
cs_pin:EBB42:PB12
spi_speed: 5000000
spi_software_sclk_pin:EBB42:PB10
spi_software_mosi_pin:EBB42:PB11
spi_software_miso_pin:EBB42:PB2

axes_map: X, Z, Y
rate: 3200

[input_shaper]
#shaper_freq_x: 0
#shaper_freq_y: 0
shaper_type: mzv
damping_ratio_x: 0.1
damping_ratio_y: 0.1

[resonance_tester]
probe_points: 60,60,60

accel_chip: adxl345
min_freq: 5
max_freq: 200
accel_per_hz: 100
hz_per_sec: 2

[gcode_shell_command RESONANCE]
command: ~/klipper/scripts/calibrate_shaper.py /tmp/resonances_x_*.csv -o /tmp/shaper_calibrate_x.png
~/klipper/scripts/calibrate_shaper.py /tmp/resonances_y_*.csv -o /tmp/shaper_calibrate_y.png
timeout: 2.
verbose: True

[gcode_macro TEST_RESONANCE]
gcode:
    ACCELEROMETER_QUERY
    G28
    TEST_RESONANCES AXIS=X
    TEST_RESONANCES AXIS=Y
    RUN_SHELL_COMMAND CMD=RESONANCE
```

Рис. 2. Конфигурационный файл прошивки

Проведя тестирование с использованием датчика, мы получили частотные характери-

стики нашего принтера по двум осям *X* и *Y* (рис. 3).

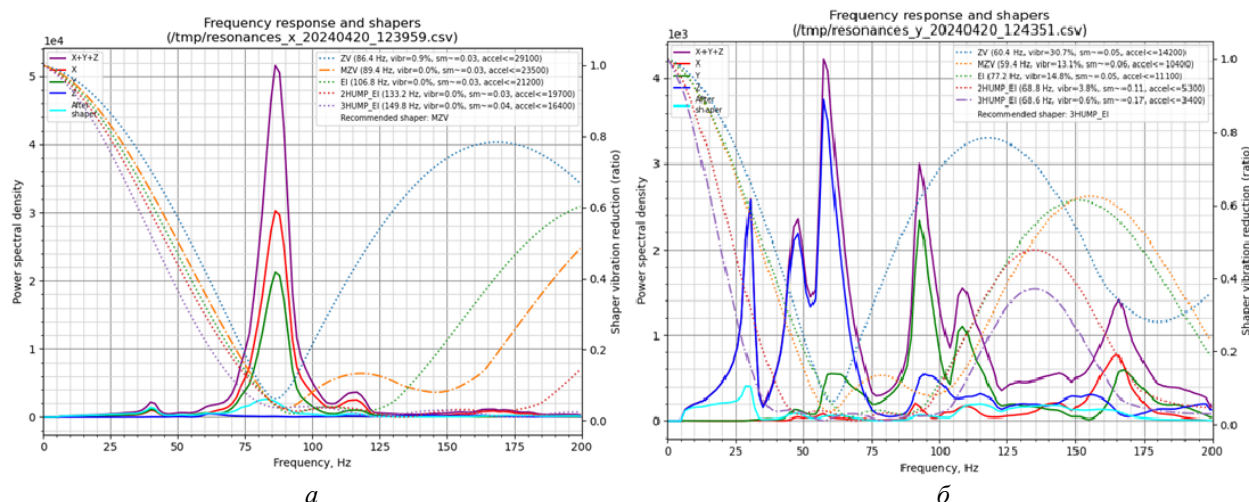


Рис. 3. Частотные характеристики:
а – по оси X; б – по оси Y

Система подает на моторы сигнал о движении в определенном направлении с ускорением и скоростью, в это время датчик снимает показания ускорений в этом направлении. Далее производится автоматический расчет и сопоставление сигналов, которые подавались на мо-

торы и снимались с них, строится частотная характеристика для каждой из осей принтера.

По графикам определяются пиковые резонансные частоты. Выбираем метод гашения по оси X – MZV с частотой 89,4 Гц, по оси Y – 3HUMP с частотой 59,4 Гц.

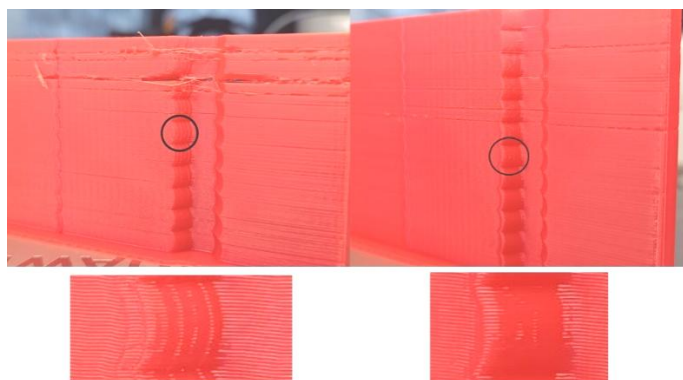


Рис. 4. Сравнение печати деталей:
слева – без inputshaper, справа – с inputshaper

По итогам проведенных экспериментов были получены две печатные детали (рис. 4). Первая печаталась с ускорением перемещения печатающей головки с начальным значением 1500 мм/с^2 , с шагом 500 мм/с^2 на каждые 5 мм высоты напечатанного изделия, а вторая печаталась с такими же параметрами печати, но с использованием алгоритма *inputshaper*. Разница в качестве печати лучше всего видна на шестом слое обеих деталей: деталь, напечатанная без *inputshaper* имеет 6 волн «Эхо», на второй этот эффект полностью отсутствует.

Данные результаты показывают, что использование алгоритмов гашения резонансных частот позволяют увеличивать скорость печати без потери прочностных характеристик, а также повысить повторяемость деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дьяченко, Е. А. Способы повышения скорости печати FDM / Е. А. Дьяченко, А. П. Порхун, М. Ю. Козенко // XXVIII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 23 октября – 6 ноября 2023 г.) : сб. материалов конф. / редкол. : С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2023. – С. 187.
2. Порхун, А. П. Экспериментальное исследование гашения резонансных частот FDM принтера / А. П. Порхун, Н. А. Золотых // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, 22–26 апреля 2024 г.) : тез. докл. / редкол. : С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ, Отдел координации научных исследований молодых ученых УНИИ, Общество молодых ученых. – Волгоград, 2024. – С. 16.
3. Дельта-функция Дирака и ее приложения: метод. указания к выполнению домашних заданий и подготовке к контрольным работам / А. Н. Павленко, О. А. Пихтилькова ; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2017.