

Исследование управления скоростью охлаждающего вентилятора 3D-принтера как средства снижения выбросов летучих органических соединений

С. Шарара

Московский государственный технологический университет "СТАНКИН"

Аннотация: В этом исследовании рассматривается управление скоростью охлаждающего вентилятора как эффективное средство снижения выбросов летучих органических соединений во время трехмерной печати методом послойного наплавления. Высокие температуры экструзии, используемые в современных высокоскоростных принтерах, приводят к выбросам вредных летучих органических соединений, что создает риски для здоровья в плохо проветриваемых помещениях. Для установления квадратичной зависимости между скоростью вентилятора и объемным потоком воздуха, который напрямую влияет на осаждение летучих органических соединений на поверхности расплава, разработана математическая модель. Экспериментальная установка использует релейное управление током двигателя и пропорционально-интегрально-дифференцирующее регулирование скорости вращения, обеспечивая быструю стабилизацию воздушного потока с минимальным перерегулированием. Из анализа переходных характеристик, включая ток двигателя, скорость вентилятора, скорость воздушного потока и потребление электроэнергии, показано, что точное управление скоростью вентилятора создает стабильное и предсказуемое движение воздушного потока, значительно снижая выбросы летучих органических соединений. Кроме того, результаты показывают, что интеграция обратной связи датчика летучих органических соединений в реальном времени с контролем скорости экструзии может предложить еще более адаптивную и эффективную стратегию для сокращения выбросов. Это исследование закладывает основу для более безопасных и эффективных процессов 3D-печати с моделированием послойного наплавления за счет улучшенного управления температурой и выбросами.

Ключевые слова: летучие органические соединения, трехмерная печать, адаптивное управление, послойное наплавление, регулирование.

Введение

Трехмерная печать методом послойного наплавления — это широко используемая технология аддитивного производства, при которой нагретые термопластичные нити экструдированы для создания трехмерных объектов. В этом процессе для расплавления нити обычно используются высокие температуры в диапазоне от 180 до 250 °С, что обычно приводит к выделению летучих органических соединений (ЛОС), таких как стирол из акрилонитрилбутадиенстирола и лактид из полимолочной кислоты. Эти

летучие органические соединения способствуют загрязнению воздуха в помещениях и представляют опасность для здоровья, особенно в таких местах, как дома, школы и офисы, где вентиляция может быть ограничена. Поскольку трехмерная печать методом послойного наплавления становится все более распространенной, определение параметров, влияющих на выбросы летучих органических соединений, имеет решающее значение для смягчения их воздействия. Температура считается основным фактором, влияющим на выбросы летучих органических соединений в процессе трехмерной печати, исследователи также изучили несколько других параметров, чтобы лучше понять и сократить эти выбросы.

За последние три года высокоскоростная трехмерная печать набирает популярность. Высокоскоростная печать повышает эффективность производства за счет ускорения времени печати, часто за счет более высоких температур экструзии и более высоких скоростей экструзии, что может потенциально увеличить выбросы летучих органических веществ и поставить под угрозу качество печати, иногда отрицательно. Скорость охлаждающего вентилятора — это параметр, который контролирует скорость затвердевания экструдированной нити. Хотя ее основная цель — улучшить качество печати, скорость охлаждающего вентилятора может также влиять на выбросы летучих органических соединений, изменяя термическую динамику процесса печати, то есть сокращая время, в течение которого нить остается при высоких температурах. Скорость вентилятора охлаждения — это параметр, который часто упускают из виду и не изучали подробно, несмотря на его потенциальную роль в высвобождении летучих органических соединений. В этом исследовании рассматривается управление скоростью охлаждающего вентилятора как эффективное средство снижения выбросов летучих органических соединений во время трехмерной печати методом послойного наплавления.

Обзор литературных источников

Проблема регулирования скорости вращения вентиляторов является предметом исследования как отечественных, так и зарубежных исследователей во многих областях – начиная с аэродинамики, и заканчивая электроприводом и теорией автоматического управления.

Разработана математическая модель статических аэродинамических характеристик (зависимости объемного расхода и давления воздуха через плоскость вентилятора от скорости вращения) с помощью аппроксимации полиномами Ньютона и Лагранжа. Показано, что наилучшая аппроксимация достигается при использовании полиномов третьего порядка, соответственно, вентилятор, как объект управления, является существенно нелинейным объектом [1, 2].

Управление нелинейным объектом, согласно принципу максимума Понтрягина, требует нелинейного управления. Авторы статьи [3] рассматривают релейное управления с критерием выхода на скользящий режим по требуемой производительности. Показано, что полученное оптимальное управление может обеспечить требуемое качество по оптимизируемому параметру, но накладывает ограничения на быстродействие электропривода вентилятора.

Эффективность регулирования частоты вращения вентиляторов стала предметом исследования в [4]. Авторы показывают, что наилучшие результаты с точки зрения эффективности отвода излишних частиц из вентилируемой области могут быть получены при применении систем подчиненного регулирования с выбором контуров по принципу кратного роста быстродействия. Данный подход частично используется, в частности, в настоящем исследовании.

Немалую роль в организации оптимального управления играет также и энергетическая эффективность системы вентиляции [5]. Хотя на настоящий

момент, как показано авторами исследования [6], особая актуальность энергоэффективности характерна для систем с мощным охлаждением, авторы указывают на перспективность данного подхода и в системах невысокой мощности.

Задачи имитационного моделирования электроприводов с вентиляторными нагрузками рассматриваются, в том числе, авторами работ [7, 8], модели которых использованы в настоящем исследовании.

Исследование [9], помимо математического моделирования и аналитического конструирования регуляторов частоты вращения, рассматривает алгоритмическую реализацию регуляторов, полученных в ходе синтеза. Подробно рассмотрены переходные характеристики выходных координат в зависимости от методов аппроксимации непрерывных систем разностными уравнениями. Рассмотрение дискретизации непрерывных систем представляет существенный интерес как в настоящем, так и в последующих исследованиях [10].

Таким образом, на основе проведенного анализа актуальных литературных источников могут быть сформулированы задачи и перспективы дальнейших исследований.

В первую очередь, в настоящем исследовании необходимо провести построение математической модели охлаждающего вентилятора, как объекта управления. Далее, на основе полученной модели необходимо построение имитационной модели, синтеза регуляторов и исследования динамических характеристик.

В перспективе, полученные в настоящем исследовании результаты могут быть эволюционно доведены от непрерывной модели до дискретной и, в окончании, до практической реализации с последующим апробированием.

Методология исследования

При проведении исследования использованы методы математического и имитационного моделирования с использованием ЭВМ. Для синтеза регуляторов скорости и производительности (объемного расхода охлаждающего воздуха) применены основные положения теории аналитического конструирования оптимальных регуляторов, принципа максимума Понтрягина и теории решения дифференциальных уравнений.

Результаты и обсуждение

В настоящем исследовании рассматривается система охлаждения низкотемпературного 3D-принтера Picaso XL. Охлаждающий вентилятор оборудован электроприводом постоянного тока с микродвигателем мощностью 8,2 Вт. Для обеспечения стабилизации температуры применено подчиненное релейное управление. Измеряемыми параметрами в рамках исследования являются ток и мощность на валу приводного двигателя. Связь статических характеристик скорости и расхода воздуха через систему охлаждения принтера может быть описана соотношением [4]:

$$F = a + b \cdot \omega^2, \quad (1)$$

где F – объемный расход воздуха через систему охлаждения, $\text{м}^3/\text{с}$;

a – коэффициент, учитывающий естественное конвекционное движение воздуха через систему охлаждения, $\text{м}^3/\text{с}$;

ω – частота вращения вентилятора (с^{-1}).

Квадратичная зависимость расхода от скорости вращения характерна для электроприводов с вентиляторной нагрузкой, и с достаточной степенью точности данная зависимость может быть линеаризована в окрестности рабочей точки.

Внутренний контур регулирования – контур тока – выполняется релейным с выходом в скользящий режим. При этом обмотка двигателя подключается либо к положительному, либо отрицательному потенциалу питания, в связи с чем, формально, двигатель непрерывно находится в режиме прямого или реверсивного пуска. Переходная характеристика тока якоря приводного двигателя показана на рис.1.

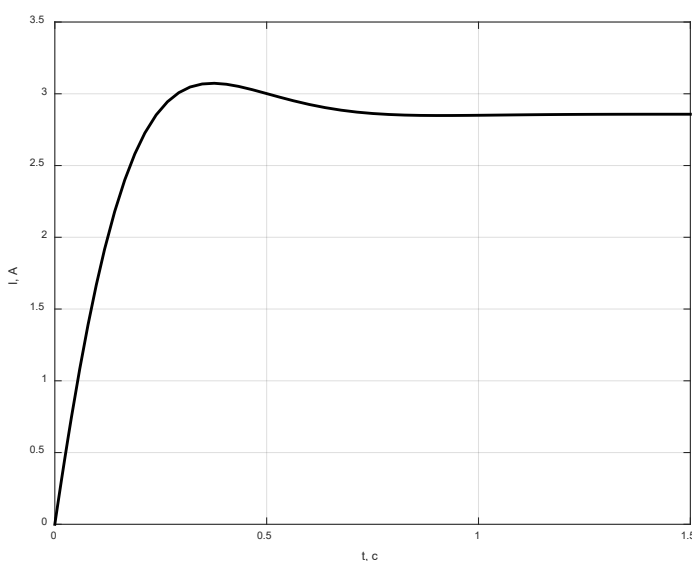


Рис. 1. – Переходная характеристика тока якоря приводного двигателя

Из анализа полученной в результате модельного эксперимента временной диаграммы тока якоря получены характеристики показателей качества переходного процесса:

- время регулирования $t_p = 0,6$ с;
- перерегулирование $\sigma = 12\%$;
- статическая ошибка $\varepsilon = 0$.

Соответственно, характеристики релейного регулятора тока близки по показателям качества к настройке на технический оптимум.

Контур регулирования частоты вращения приводного двигателя, ввиду невозможности непосредственного измерения без внесения изменений в

конструкцию принтера, синтезировался с учетом обратной связи на основе неполного наблюдателя Люенберга [3] с учетом механической характеристики маломощных двигателей постоянного тока. Данный контур настраивался на биномиальный оптимум с применением пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора. Переходная характеристика скорости вращения вала приводного двигателя приведена на рис.2.

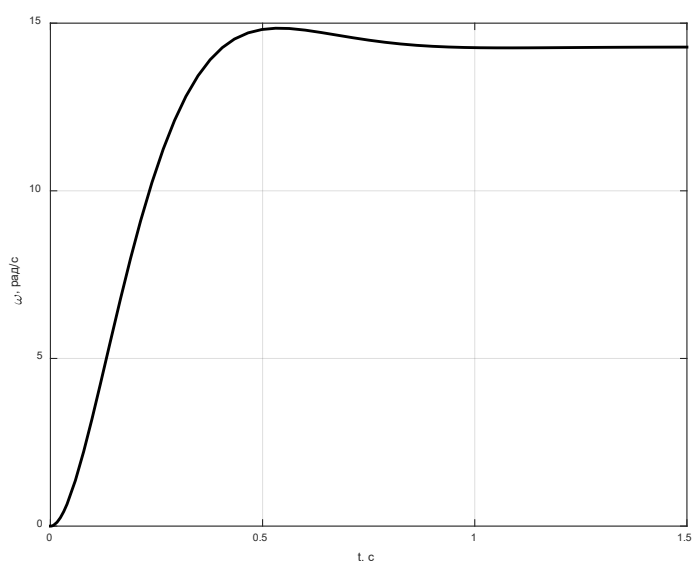


Рис. 2. – Переходная характеристика частоты вращения вала приводного двигателя

Из анализа переходной характеристики сделан вывод об установившейся частоте вращения вентилятора $\omega_{\infty} = 14 \text{ с}^{-1}$, а также о применимости рассматриваемого подхода при синтезе подчиненной системы регулирования. Так, время переходного процесса возрастает при переходе от внутреннего контура к внешнему, а перерегулирование снижается. В связи с этим возможно представление настроенных внутренних контуров в виде инерционных звеньев первого порядка, с целью снижения порядка рассчитываемых дифференциальных уравнений при дальнейшем синтезе.

Расход воздуха через плоскость вентилятора, как показано в исследовании [6], линейно влияет на градиент температур в охлаждаемой зоне и на поверхности наплавления, соответственно, скорость осаждения ЛОС прямо пропорциональна данному параметру.

Регулирование расхода могло производиться как с использованием непосредственного измерения с установкой преобразователя расхода (камерной диафрагмы) на входе системы охлаждения, так и с вычислением расхода косвенным методом. В рамках настоящего исследования использован наблюдатель на основе уравнения (1). ПИД-регулятор расхода настраивался на технический оптимум. Переходная характеристика расхода показана на рис.3.

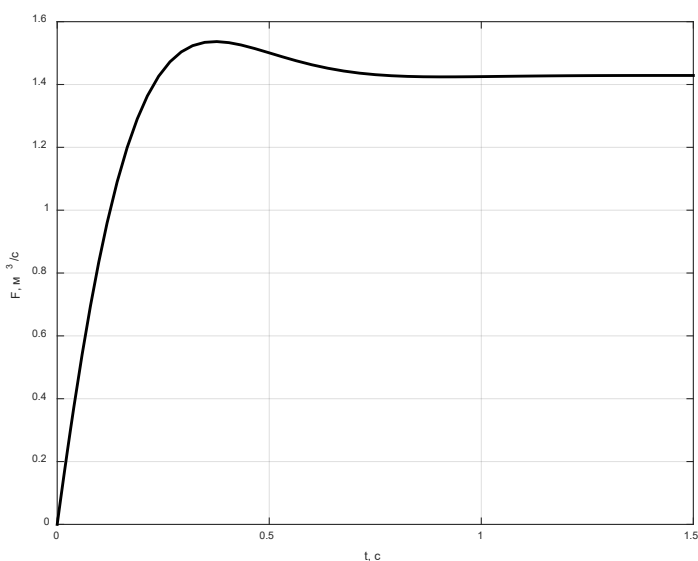


Рис. 3. – Переходная характеристика расхода через поперечное сечение вентилятора

Из переходной характеристики рис.3 сделан вывод о стабилизации подачи охлаждающего воздуха в течение 0,8 с. Перерегулирование не превышает 20%. Соответственно, построенная подчиненная система

регулирования расхода позволяет осуществлять любой необходимый на практике профиль охлаждения.

Для повышения точности регулирования возможно введение дополнительного контура регулирования момента. При этом возможно как измерение тока якоря, прямо пропорционального момента, так и использование в качестве наблюдаемой величины потребляемой электрической мощности (рис.4).

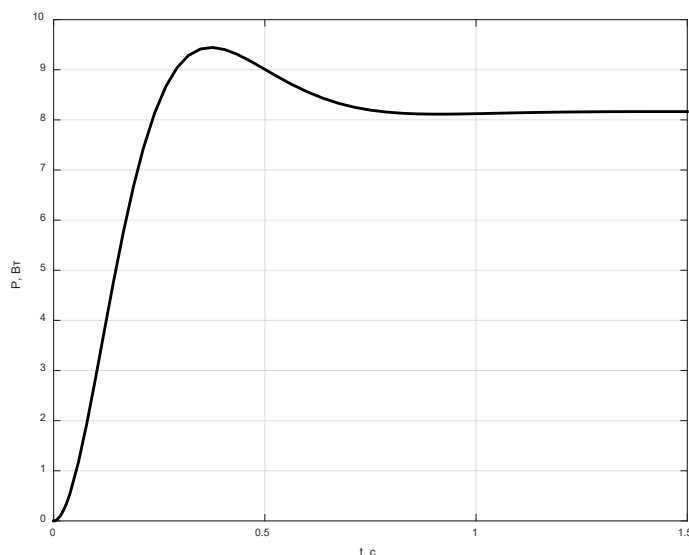


Рис. 4. – Переходная характеристика мощности, потребляемой вентилятором

Из рис.4 может быть сделан вывод о пропорциональности электрической мощности расходу через сечение вентилятора, в связи с чем потенциально перспективным является построение регулятора потребляемой мощности, косвенно влияющей на остальные параметры вентилятора.

Выводы

Экспериментальные результаты, как показано на рис.1-4, показывают, что точное управление скоростью охлаждающего вентилятора может эффективно снизить выбросы летучих органических соединений во время трехмерной печати. Переходная характеристика тока якоря приводного двигателя (рис.1) показывает быструю стабилизацию тока двигателя —

достижение устойчивого состояния примерно за 0,6 секунды с минимальным перерегулированием — что указывает на надежный внутренний контур управления током, который обеспечивает стабильную работу вентилятора. Эта последовательность дополнительно подтверждается переходом скорости вращения (рис.2), где вентилятор быстро достигает и поддерживает свою целевую скорость, тем самым создавая предсказуемый воздушный поток, необходимый для регулирования тепловых условий во время печати и улучшения осаждения летучих органических соединений на поверхности расплава. Переходная характеристика расхода через поперечное сечение вентилятора (рис.3) подтверждает предсказание математической модели квадратичной зависимости между скоростью вентилятора и расходом воздуха, которая становится линеаризованной вокруг рабочей точки; это предсказуемое поведение позволяет точно модулировать воздушный поток для оптимизации осаждения летучих органических соединений и минимизации выбросов в рабочую среду. Кроме того, переход потребления электроэнергии (рис.4) устанавливает четкую корреляцию между потреблением электроэнергии и скоростью воздушного потока, подтверждая использование мониторинга мощности в качестве эффективного косвенного измерения производительности вентилятора. В совокупности эти выводы показывают, что эффективное управление скоростью охлаждающего вентилятора создает стабильную и предсказуемую среду воздушного потока, которая значительно способствует сокращению выбросов летучих органических соединений.

Однако косвенный характер этой стратегии смягчения подчеркивает необходимость дальнейших исследований для установления окончательной корреляции между скоростью вентилятора и концентрацией летучих органических соединений. Интеграция обратной связи датчика летучих

органических соединений в реальном времени с управлением скоростью экструзии предлагает более эффективное и адаптивное решение.

Литература

1. Вечеркин М.В., Сарваров А.С., Самарина И.Г. Моделирование аэродинамических характеристик центробежных вентиляторов с осевым направляющим аппаратом // Электротехнические системы и комплексы. 2022. №4(57). С. 69-75.
2. Heo M.W. Kim J.-H., Kim K.-Y. Aerodynamic and aeroacoustic optimization for design of a forward-curved blades centrifugal fan // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2016. V. 230. №2. pp. 154-174.
3. Зедгенизов Д.В. Критерий перехода системы управления вентилятором в режим динамического регулирования производительности // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т.2. № 3. С. 138-142.
4. Пинскер О.В., Мухортиков С.Г., Квитков В.В. Оценка эффективности регулирования частоты вращения вентиляторов местного проветривания угольных шахт // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 4(174). С. 27-36.
5. Sharapov A. I. Increase of energy efficiency of the mechanical ventilation system // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 272. №2. URL: doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022218.
6. Абакумов А.М., Абакумов О.А., Зубков Ю.В. Энергосберегающие режимы работы установок охлаждения природного газа // Электричество. 2025. № 1. С. 50-57.
7. Vaccarini M., Carbonari A., Casals M. Development and calibration of a model for the dynamic simulation of fans with induction motors // Applied thermal engineering. 2017. V. 111. pp. 647-659.

8. Садулаев А.А.В., Исаева М.Р., Хакимов З.Л., Муртазова Х.Т. Проектирование автоматизированной системы управления параметрами микроклимата помещения пекарни // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Т. 19. № 2(32). С. 32-38.

9. Иванова В.Р., Новокрещенов В.В., Роженцова Н.В. Разработка алгоритма для эффективного управления технологическим процессом промышленного предприятия на базе программируемого логического контроллера TM171PDM27S Schneider Electric // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 2. С. 75-85.

10. Shi Y. Zhao W., Li Sh., Li B., Sun X. Novel discrete-time recurrent neural network for robot manipulator: A direct discretization technical route // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2021. V. 34. №6. pp. 2781-2790.

References

1. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Samarina I.G. Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы. 2022. №4(57). pp. 69-75.

2. Heo M.W. Kim J.-H., Kim K.-Y. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2016. V. 230. №2. pp. 154-174.

3. Zedgenizov D.V. Interekspo Geo-Sibir'. 2022. V.2. № 3. pp. 138-142.

4. Pinsker O.V., Mukhortikov S.G., Kvitkov V.V. Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. 2024. № 4(174). pp. 27-36.

5. Sharapov A. I. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 272. №2. URL: doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022218.

6. Abakumov A.M., Abakumov O.A., Zubkov Yu.V. Elektrichestvo. 2025. №1. pp. 50-57.



7. Vaccarini M., Carbonari A., Casals M. Applied thermal engineering. 2017. V. 111. pp. 647-659.
8. Садулаев А.А.В., Исаева М.Р., Хакимов З.Л., Муртазова Х.Т. Vestnik GGNTU. Tehnicheskie nauki. 2023. V. 19. № 2(32). pp. 32-38.
9. Ivanova V.R., Novokreshchenov V.V., Rozhentsova N.V. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2020. V. 22. №2. pp. 75-85.
10. Shi Y. Zhao W., Li Sh., Li B., Sun X. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2021. V. 34. №6. pp. 2781-2790.

Дата поступления: 6.04.25

Дата публикации: 25.05.25