Issue 2/2026

The EC Manufacturing Journal

Published by the Engineering Association *Yerevan, June 15, 2026*

The purpose of the Journal is to build-up and share our knowledge in manufacturing as a contribution toward the high-tech manufacturing movement in Armenia.

Table of Contents

. Editorial 1
. От шедевров Возрождения до титановых турбин: как работает 5-осевой ЧПУ станок 1
Что такое 5-осевая обработка и зачем она нужна? 2
При чем тут Рене Декарт, муха и самолёты? 2
А сколько вообще осей вам нужно? 4
Мозг станка: обзор CAM-систем и мой личный выбор 5
Что и почему я выбрал для нашего производства 5
Разбираемся в терминах: что такое «3+2» и чем оно отличается от настоящих 5 осей 6
Непрерывная 5-осевая обработка — арена hyperMILL 6
Финал: оборудование, реальность и немного философии 7

. Editorial

An interesting article that combines technology, science, art, history, skills, philosophy, observations, analysis, experimentation, discoveries, and suggestions how to move forward. The article is written in an easy and intriguing style for professionals and non-professionals alike.

. От шедевров Возрождения до титановых турбин: как работает 5-осевой ЧПУ станок

by Armen Arustamyan, YEA Manufacturing

Всем привет! Меня зовут Армен Арустамян, я инженер-механик и отвечаю за механическое производство в YEA Engineering.

Ходит популярная байка, что когда Микеланджело спросили, как он создаёт свои скульптуры, он ответил: «Я просто беру глыбу мрамора и отсекаю всё лишнее». Звучит, конечно, красиво. Но я бы посмотрел, как он «просто отсёк бы всё лишнее» от цельной болванки сложной аэрокосмической детали.

На производстве мы каждый день делаем детали, которые ещё несколько десятилетий назад считались бы практически невозможными. Поэтому сегодня я хочу без лишней воды рассказать о том, с чем работаю сам — о 5-осевых фрезерных станках. Попробуем разобрать эту технологию простым человеческим языком, чтобы было понятно, как она устроена на самом деле и почему она так крута.



Что такое 5-осевая обработка и зачем она нужна?

• Если говорить совсем просто, 5-осевая обработка — это когда станок может одновременно перемещать режущий инструмент или деталь по пяти осям. Именно поэтому такая обработка широко применяется в аэрокосмической отрасли и при изготовлении сложных деталей, например импеллеров. Почему мы на производстве так любим эту технологию? Тут всё просто:

• Принцип «сделал за один установ». Закинул заготовку, закрепил — и станок обрабатывает её практически со всех сторон. Не нужно вытаскивать деталь, переворачивать, делать сложную оснастку и заново выставлять нули. Это экономит кучу времени и снижает погрешности, связанные с переустановкой.

• Можно обработать труднодоступные зоны. Станок наклоняет деталь или шпиндель так, что мы можем выфрезеровать сложную геометрию (например, поднутрения) и при этом избежать столкновения инструмента с деталью или столом. Инструмент служит дольше за счёт того, что всегда работает под правильным углом к металлу. Резание проходит мягче, станок не «дробит», а качество поверхности становится лучше.

При чем тут Рене Декарт, муха и самолёты?



Чтобы понять, откуда берутся эти 5 осей, давайте вспомним школу. Все знают историю про Ньютона и яблоко, но есть похожая байка про философа и математика Рене Декарта.

Как-то раз Декарт лежал в постели (философы вообще любили это дело) и наблюдал за мухой, которая кружила по комнате. И тут он понял, что можно описать точное положение этой мухи в пространстве всего тремя числами: длина, ширина и высота.

Так появилась декартова система координат — X, Y и Z. На станке это базовые перемещения: влево-вправо, вперёд-назад и вверх-вниз. Это классические три оси.

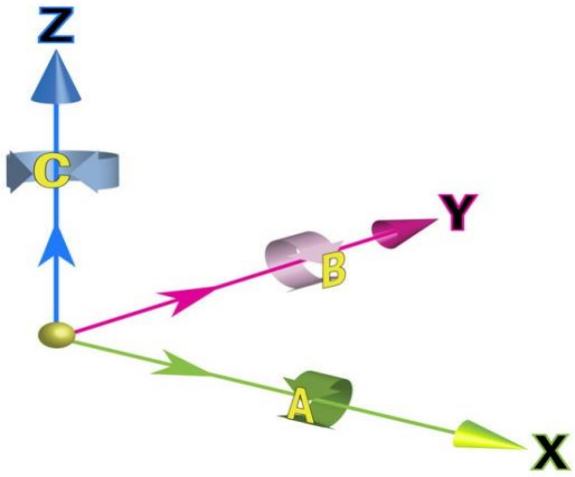
Но откуда берутся ещё две?

А теперь представьте эту муху в полёте крупным планом. Она ведь не просто перемещается как точка в пространстве — она ещё и меняет ориентацию.

Тут удобно сравнить оси станка с движениями самолёта:

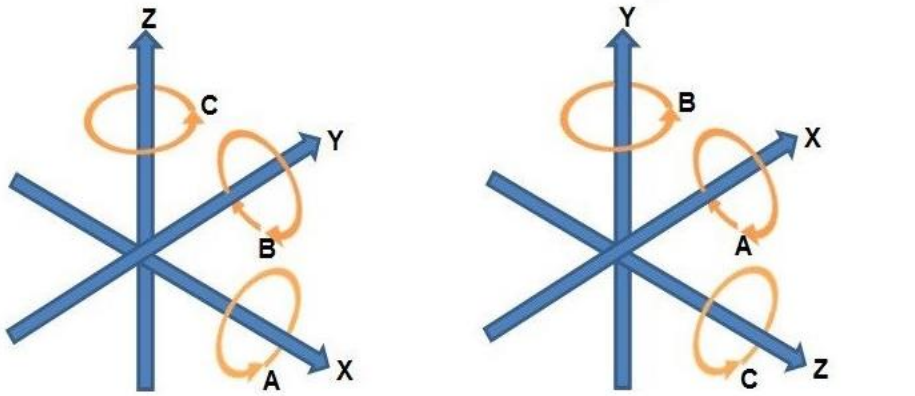
1. Представьте, что самолёт кренится на крыло. Это вращение вокруг продольной оси X. В ЧПУ это обычно называют осью A.
2. Когда самолёт задирает нос вверх или опускает вниз (тангаж) — это вращение вокруг оси Y. В станках это ось B.
3. А когда самолёт поворачивает нос влево или вправо параллельно земле (рыскание) — это вращение вокруг вертикальной оси Z. В станках это ось C.

Полноценный 5-осевой станок использует классические перемещения X, Y, Z и добавляет к ним две оси вращения (например, поворот стола по оси C и наклон по оси A). Вот и вся «магия».



Оси A, B и C обычно обозначаются в алфавитном порядке, соответствуя вращательным движениям относительно осей X, Y и Z. Хотя существуют и 6-осевые станки с ЧПУ, 5-осевые конфигурации встречаются чаще, поскольку шестая ось в большинстве случаев не даёт существенного практического преимущества.

Последнее замечание о системе обозначений: в вертикальном обрабатывающем центре оси X и Y располагаются в горизонтальной плоскости, а ось Z — в вертикальной. В горизонтальном обрабатывающем центре ориентация осей отличается: ось Z остаётся вертикальной, а расположение осей X и Y зависит от конкретной компоновки станка.



Вертикальный обрабатывающий станок **Горизонтальный обрабатывающий станок**

А сколько вообще осей вам нужно?

Иногда в каталогах оборудования или на выставках можно встретить «монстров», у которых заявлено 7, 9 или даже 11 осей. Звучит как полный космос. Кажется, что для программирования такой машины нужна команда учёных из NASA. Но на самом деле всё гораздо проще, чем кажется.

Как правильно объясняет Майк Финн, один из ведущих инженеров Mazak America, большое количество осей появляется не потому, что деталь уходит в какое-то четвёртое измерение. Всё дело в количестве «рабочих узлов» внутри одного станка.

Представьте навороченный многофункциональный станок. У него может быть не один шпиндель, а два (основной и противошпиндель), плюс две револьверные головки — верхняя и нижняя. Верхняя головка двигается по своим осям, нижняя — по своим, а противошпиндель добавляет ещё одну степень свободы.

В сумме это может давать 9 и более осей в одном корпусе. По сути, такой станок работает как швейцарский нож: он может и точить, и фрезеровать, и выполнять операции параллельно, без переустановки детали.



Но тут важно понимать одну ключевую инженерную мысль, о которой часто говорят в отрасли: сколько бы осей ни было у самого станка, геометрия детали остаётся пятиосевой.

Возьмём, например, сложный авиационный клапан или импеллер. Мы можем обработать его на обычном 5-осевом вертикальном станке. А можем использовать многоосевой обрабатывающий центр, где есть наклоняемая ось B, два шпинделя (две оси C), стандартные перемещения X, Y, Z, а также дополнительная нижняя револьверная головка со своими осями X и Z.

Осей становится много, станок внутри выглядит как трансформер, но сама деталь на выходе остаётся той же пятикоординатной по своей геометрии.

Все эти «дополнительные» оси нужны не для усложнения формы, а для повышения производительности. Чтобы выполнять больше операций за один цикл, совмещать токарную и фрезерную обработку и не тратить время на переустановку детали и лишние переходы.

Мозг станка: обзор CAM-систем и мой личный выбор

Когда речь заходит о пяти осях, писать программу вручную — это почти фантастика. Пытаться в голове просчитать траекторию, где одновременно двигаются и поворачиваются пять осей, — самый быстрый способ запутаться и отправить дорогой шпиндель на досрочный ремонт. Без CAM-систем инженер здесь как без рук.

Рынок софта огромный, но у каждого популярного решения есть свои особенности, которые я бы разделил так

- **Autodesk Fusion 360**: отличный инструмент для старта или несложного позиционирования. Но когда дело доходит до тяжёлой многоосевой обработки, его базовых возможностей начинает не хватать, а покупка дополнительных расширений (Extensions) не всегда оправдывает ожидания из-за сложности тонкой настройки постпроцессоров.

- **SolidCAM**: интеграция с SolidWorks — это удобно, а фирменная стратегия черновой обработки iMachining действительно хорошо себя показывает. Однако алгоритмы контроля коллизий шпинделя при сложной пятиосевой обработке уступают специализированным решениям более высокого уровня.

- **Siemens NX**: настоящий индустриальный гигант. В нём можно построить траекторию для детали практически любой сложности, но интерфейс требует от инженера чего-то вроде отдельной подготовки и большого запаса терпения. Порог входа здесь крайне высокий.

Что и почему я выбрал для нашего производства

Проанализировав эти решения, для непрерывной 5-осевой обработки в YEA Engineering я сделал ставку на связку HyperMILL и VERICUT.



HyperMILL (от Open Mind) — это, пожалуй, одно из лучших решений для одновременной пятиосевой обработки. Его алгоритмы расчёта траекторий для турбинных лопаток, каналов и импеллеров работают очень стабильно. Программа сама определяет, под каким углом наклонить инструмент, чтобы эффективно снимать материал и обходить оснастку.

Но какой бы «умной» ни была CAM-система, она работает в рамках своих математических моделей. Она не видит, что именно получится после постпроцессора в итоговом G-коде.

Поэтому в пару к hyperMILL я добавил VERICUT. Это независимый цифровой двойник станка. Он берёт «сырой» G-код, который пойдёт в стойку, и симулирует обработку максимально близко к реальности. VERICUT позволяет выявить выходы за пределы хода осей, ошибки в коде и потенциальные столкновения.

Связка hyperMILL (как генератора траекторий) и VERICUT (как независимого контролёра) — это моя личная страховка от аварий на оборудовании, стоимость которого измеряется сотнями тысяч долларов.

При этом для позиционной обработки в режиме «3+2» я оставил Mastercam. У него интуитивная работа с плоскостями, а его алгоритмы высокоскоростного 2D- и 3D-фрезерования (Dynamic Milling) до сих пор считаются одними из лучших. Когда нет необходимости в одновременном вращении осей, Mastercam позволяет готовить управляющие программы быстрее и проще, чем более тяжёлые многоосевые системы.

Разбираемся в терминах: что такое «3+2» и чем оно отличается от настоящих 5 осей

В профессиональной среде часто возникает путаница: если у станка пять осей, то любую обработку на нём называют пятиосевой. На самом деле это два принципиально разных процесса.

Режим «3+2» (позиционная обработка)

Представьте деталь, которую нужно обработать со всех сторон. Чтобы не переустанавливать её вручную (и не терять точность базирования), две поворотные оси станка разворачивают заготовку под нужным углом относительно шпинделя.

После того как деталь заняла нужную позицию, поворотные оси фиксируются. Станок фактически превращается в жёсткий 3-осевой центр и работает по осям X, Y и Z.

Дальше логика простая: обработали одну сторону — остановились, разжали поворотные оси, повернули деталь в новое положение, снова зафиксировали и продолжили обработку.

В этом режиме поворотные оси участвуют только в позиционировании между проходами, а само резание идёт как в обычной 3-осевой обработке. Именно для таких задач и подходит Mastercam: быстрое построение траекторий и стабильная работа в режиме «3+2».

Непрерывная 5-осевая обработка — арена hyperMILL

Здесь всё устроено по-другому. Станок нигде не останавливается и ничего не блокирует. Все пять осей двигаются одновременно в режиме реального времени.

Зачем это нужно? Представьте изогнутую лопасть импеллера. Её поверхность должна быть максимально гладкой. Если инструмент останавливается или происходит разрыв траектории (как в режиме «3+2» при переходе между позициями), на поверхности может появиться ступенька или след от перехода. Для аэродинамических деталей это уже потенциальный брак.

Поэтому фреза должна пройти всю сложную поверхность за один непрерывный проход, плавно повторяя её форму. Инструмент постоянно меняет положение и наклон прямо во время резания, без остановок и рывков.
Именно для таких задач я выбрал hyperMILL — его математические алгоритмы хорошо отрабатывают непрерывные пятиосевые траектории, позволяя получать стабильную обработку сложной геометрии с высоким качеством поверхности.

Финал: оборудование, реальность и немного философии

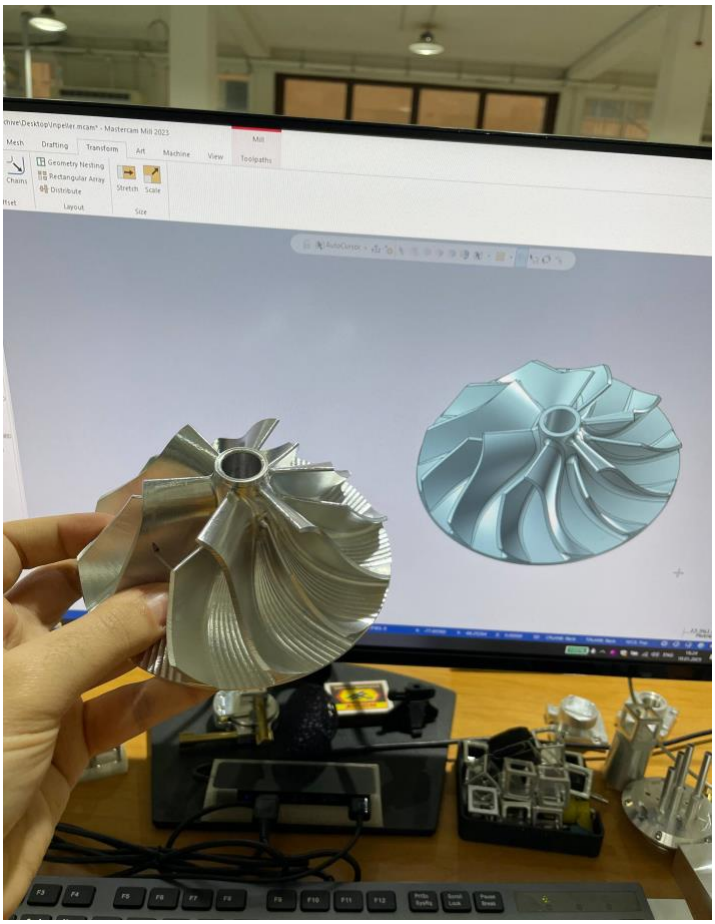
Наш флагман для всей этой сложной геометрии — пятиосевой обрабатывающий центр HAAS UMC-750SS.

Одна из самых показательных деталей, которые мы на нём делали, — импеллер. Глядя на такую деталь, сразу понимаешь, зачем вообще нужны пять осей.

Но давайте снимем розовые очки: полная непрерывная пятиосевая обработка не используется в 90% повседневных заказов. И это абсолютно нормально — так устроен рынок во всём мире. Такие технологии в первую очередь востребованы в авиации, космосе и высокотехнологичном производстве.
Тогда зачем инвестировать в пять осей, если 90% работы — это три? Всё просто: я чётко понимаю, куда движутся технологии. Почти каждый месяц появляются новые стратегии обработки, новые инструменты и программные решения, которые меняют правила игры. Оставаться в стороне от этого — значит постепенно отставать.

И в конце — о том, с чего я начал. Современный CAM-софт — это всего лишь инструмент, как молоток и зубило у Микеланджело. Но что получится в итоге — просто обработанная заготовка или действительно сложная, качественная деталь — зависит от инженера за станком.

Поэтому, помимо жёстких технических навыков, в нашей работе важно пространственное мышление и немного подхода, как у конструктора и художника одновременно.



На этом всё. Я Армен Арустамян, и если после этой статьи у вас наконец сложилась картинка того, как работает пятиосевой станок, значит, мы не зря потратили время. До встречи.

© 2026 The Authors of the articles

All materials contained in *The ARC Journal* may be used with reference to the Authors.

For feedback on the *Journal*, its content, and its articles please send to info@engineeringcity.am.

To submit articles, please send to info@engineeringcity.am. Articles can be in any language.