

5. **Ефимов К. В.** Краткий курс аналитической геометрии. — М. Наука. 1969. — 273 с.

6. **Клименко С. А., Манохин А. С.** Твердое «бреющее» точение // Сверхтвердые материалы. — 2009. — № 1. — С. 58–74.

7. **Коновалов Е. Г., Сидоренко В. А., Соусь А. В.** Прогрессивные схемы ротационного резания металлов. — Мн: Наука и техника. — 1972. — 272 с.

8. **Минасян Г. С.** Шероховатость поверхности при точении безвершинным резцом БРМ-1 // Изв. АН АССР. Т. XXIII. — 1970. — № 4. — С. 3–6.

9. **Петрушин С. И., Филиппов А. В.** Анализ геометрии косоугольного обтачивания безвершинными резцами // Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты. — 2013. — № 2. — С. 8–14.

10. **Подгорков В. В.** Чистовое точение однокромочными резцами // СТН. — 1974. — № 1. — С. 30–31.

11. **Рывкин Г. М., Самойлов Б. И.** Чистовое точение резцами с перемещаемой режущей пластинкой // Станки и инструмент. — 1952. — № 4. — С. 20–22.

12. **Филиппов А. В.** 3D моделирование геометрии косоугольного точения // Инновации в машиностроении: Сб. трудов ММК. — Томск: Изд-во ТПУ. — 2012. — С. 178–182.

13. **Филиппов А. В.** Сечение срезаемого слоя при косоугольном точении безвершинным резцом // СТН. — 2014. — № 4. — С. 21–25.

14. **Ящерицын П. И., Борисенко А. В., Дривотин И. Г., Лебедев В. Я.** Ротационное резание металлов. — Мн.: Наука и техника. — 1987. — 229 с.

15. **Grzesik W.** A real picture of plastic deformation concentrated in the chip produced by continuous straight-edged oblique cutting // Int. J. Mach. Tools Manuf. — 1991. — Vol. 31. — № 3. — P. 329–344.

16. **Grzesik, W.** Investigations of surface textures produced by oblique machining of different workpiece materials / W. Grzesik, K. Zak // Archives of Materials Science and Engineering. — 2011. — № 52. — P. 46–53.

17. **Filippov A. V.** Constructing a model of the equivalent wedge oblique cutting edge // Applied Mechanics and Materials. — 2013. — Vol. 379. — P. 139–144.

УДК 621.941

Модульный подход к построению специализированной системы ЧПУ для обрабатывающих центров наклонной компоновки*

д.т.н. Г. М. Мартинов, к.т.н. Р. А. Нежметдинов

// МГТУ «СТАНКИ», г. Москва, martinov@ncsystems.ru

Аннотация. Предложен модульный подход к построению специализированной системы ЧПУ для обрабатывающих центров наклонной компоновки на основе базовой вычислительной платформы АксиОМАКонтроль. Исследована специфика обрабатывающих центров наклонной компоновки, проанализирована их кинематическая схема, систематизированы требования к системе управления. Определен дополнительный набор станочных и измерительных циклов, специализированных М-функций и экраны интерфейса оператора. Проиллюстрирована сетевая архитектура системы управления на примере станка мод. «НАКЛОН 535». **Ключевые слова:** обрабатывающий центр наклонной компоновки, система ЧПУ, сетевая архитектура СЧПУ, SoftPLC, EtherCAT.

Abstract. Proposed modular approach to building a specialized CNC machining centers inclined layout, based on the underlying computing platform Axiomcoders. Investigated the specificity of machining centers inclined layout, analyzed their kinematic scheme, systematic requirements management system. Defines an additional set of machine and measuring cycles, specialized M-functions and screens of the operator interface. Illustrated network architecture systems upravleniya example of machine «TILT 535». **Keywords:** machining center inclined layout, CNC system, network architecture PM, SoftPLC, EtherCAT.

* Работа выполнена в рамках программы «Государственная поддержка ведущих научных школ», грант НШ-3890.2014.9 и по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук, МК-43.2013.8.

Ведущие мировые станкостроительные компании активно продвигают на рынок металлорежущие станки (МС) наклонной компоновки, предназначенные для токарно-фрезерной обработки сложных деталей с минимально возможным временем выпуска одной детали [1–3].

Преимущество токарно-фрезерных обрабатывающих центров (ОЦ) по сравнению с обычными токарными МС достигается путем оснащения МС высокоскоростным фрезерным шпинделем. В результате потребитель получает возможность осуществлять технологический процесс обработки деталей, имеющих сложную геометрию. При этом обеспечивают не только высокую точность готовых деталей (в результате исключения переустановки детали при обработке на нескольких МС), но и сокращают число необходимого оборудования и временные затраты на выполнение вспомогательных переходов (переустановка заготовки; подготовка оснастки и режущих инструментов (РИ) МС), что позволяет увеличить коэффициент загрузки производственного оборудования и освободить производственные площади [4].

МС мод. NZ2000 (фирма MoriSeiki, Япония) оборудован двумя или тремя револьверными головками для токарно-фрезерной обработки сложных деталей. При этом одна из револьверных головок расположена снизу, что позволяет обрабатывать несколько деталей одновременно. Компонировка позволяет избежать использования люнетов и поднять производительность токарной обработки длинных деталей в результате «сбалансированного» резания двумя резцами параллельно с двух сторон (см. таблицу).

Многофункциональный токарно-фрезерный ОЦ Super мод. NTJX (фирма Nakamura-Tome, Япония) комплектуют двумя шпинделями, одной револьверной головкой и одним фрезерным шпинделем с автоматической сменой РИ. Возможность одновременной обработки деталей в шпинделе и протившпинделе РИ револьверной головки и фрезерного шпинделя обеспечивает сокращение циклов обработки (см. таблицу).

МС мод. TTC Serie (фирма Spinner, Германия) оснащен жесткими направляющими скольжения для гашения вибраций, что обуславливает высокие технические характеристики при резании. Конструкция МС включает в себя высокоскоростные 12-позиционные серво-револьверные головки, встроенные мотор-шпиндели и приводной РИ для всех 12 позиций. Сравнение характеристик ОЦ наклонной компоновки мировых производителей и отечественных разработок приведены в таблице.

Специализированная система ЧПУ сложным многофункциональным ОЦ мод. «НАКЛОН 535» построена с использованием базовой вычисли-

тельной платформы «АксиОМАКонтрол» (ОМА — Открытая Модульная Архитектура), разработанной в МГТУ «СТАНКИН» [5 и 6]. Платформа имеет открытую модульную архитектуру и кроссплатформенное ядро [8 и 9].

Многофункциональный обрабатывающий центр мод. «НАКЛОН 535» не уступает по техническим характеристикам аналогичному оборудованию мировых производителей, однако на этапе проектирования в нем были заложены новаторские решения, рассмотренные в статье, которые при правильном подходе пользователя можно превратить в конкурентные преимущества [11 и 12].

Проведение анализа кинематической схемы МС позволяет: определить число каналов управления, число одновременно интерполируемых осей; закрепить оси за каналом управления; реализовать оптимальные схемы и технологические особенности обработки деталей на проектируемом оборудовании [7 и 9].

Токарно-фрезерный ОЦ мод. «Наклон 535» наклонной компоновки (рис. 1, а) оснащен: продольными (X_1 , X_2) и поперечными (Z_1 , Z_2) осями верхнего и нижнего суппортов, основным шпинделем и протившпинделем (с возможностью продольного перемещения — ось Z) для обеспечения параллельной обработки. При этом две детали, закрепленные в шпинделе и протившпинделе соответственно, одновременно обрабатывают РИ, установленные в нижнем суппорте и фрезерном шпинделе.

Оба шпинделя, установленные на токарно-фрезерном ОЦ — интерполируемые, что позволяет ус-

Параметр	NZ2000 (фирма MoriSeiki)	SuperNTJX (фирма Nakamura-Tome)	TTC Serie (фирма Spinner)	НАКЛОН 535 (ОАО «Саста»/МГТУ «СТАНКИН»)
Число револьверных головок	2	1	2 (1)	2
Число шпинделей	2	2	2	2
Максимальный диаметр обработки, мм	320	245	250	380
Максимальная длина обработки, мм	810	1090	400	1000
Число инструментов	16×2	24	12 (24)	12×2
Мощность главного привода, кВт	22	15	15	30
Мощность протившпинделя, кВт	22	15	15	30
Частота вращения главного привода, об/мин	0—5000	0—6000	0—5000	0—4000
Масса станка, кг	8300	14 000	4600	10 000
Габаритные размеры станка (длина × ширина × высота), мм	3930 × 2320 × 2740	4718 × 2922 × 2445	2500 × 1900 × 2200	6065 × 2160 × 2320
Модель системы ЧПУ	MoriSeiki MAPPS IV	Fanuc 31i-A	Siemens/Fanuc	АксиОМА Контрол
Частота вращения фрезерного шпинделя, об/мин	6000 (опция — 12 000)	8000 (опция — 12 000)	опция (6000)	7000

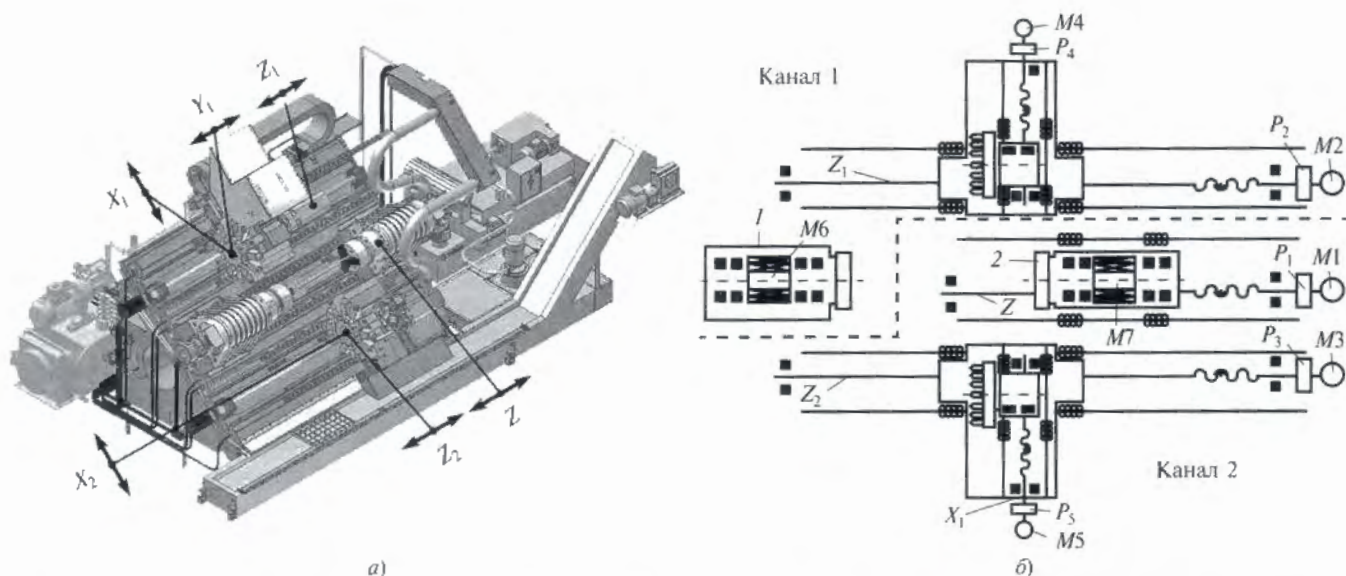


Рис. 1. Токарно-фрезерный ОЦ мод. «НАКЛОН 535» наклонной компоновки: а — общий вид; б — кинематическая схема (1 — главный привод; 2 — противопиндель)

танавливать в них не только фрезерные, но и токарные РИ. Схема одновременной обработки двумя РИ деталей типа тел вращения (как с одной стороны, так и с обеих сторон) увеличивает производительность оборудования и срок эксплуатации РИ в результате компенсации радиальных составляющих сил резания.

Кинематическая схема ОЦ наклонной компоновки требует от системы ЧПУ реализации двухканального управления (рис. 1, б). Канал 1 управляет верхним суппортом (оси X_1, Y_1), продольной осью Z_1 и шпиндельным узлом W . Канал 2 управляет нижним суппортом (оси X_2, Z_2), продольной осью Z и противопинделем $W1$.

Режим работы с несколькими каналами в системе ЧПУ «АксиОМАКонтроль» настраивают в машинных параметрах, где определяют число доступных каналов управления и закрепляют оси за конкретным каналом.

Систематизируя требования, предъявляемые к системам ЧПУ при управлении сложными технологическими объектами, можно выделить группу общих требований, необходимых при работе с любыми МС. Это: открытость; модульность; функция коррекции траектории движения; удаленное управление и др. Также можно выделить группу частных требований, актуальных для конкретного оборудования и определяемых особенностью функционирования технологического оборудования [5 и 6].

Частные требования МС наклонной компоновки следующие.

1. Многоканальность, обеспечивающая параллельное выполнение нескольких управляющих программ (УП) в одной системе ЧПУ. В системе «АксиОМАКонтроль» предусмотрен экран работы с двумя каналами управления, который отображает информацию о текущих координатах осей, скоростях шпинделей, G- и M-векторы и выбранную программу на каждом из каналов. Активный канал имеет станочную панель, функциональные и машинные клавиши для запуска, останова и редактирования УП.

Реализован набор специализированных функций языка высокого уровня для работы в многоканальном режиме через главную УП: `channel_load` — загрузка УП на канале; `channel_run` — загрузка и запуск УП на канале; `channel_start` — запуск (возобновление) работы УП на канале; `channel_stop` — останов УП на канале; `channel_reset` — сброс канала; `channel_wait` — ожидание конца выполнения УП на разных каналах.

2. Многошпиндельная обработка. Наличие привода главного движения, противопинделя и фрезерного шпинделя на инструментальной головке позволяет обрабатывать изделия одновременно несколькими РИ. Реализация многошпиндельной обработки в системе ЧПУ предполагает специализированный механизм выявления коллизий в УП при

одновременной обработке двумя шпинделями и наличие специализированной М-функции для передачи детали между шпинделем и противошпинделем.

3. Набор специализированных токарных, фрезерных, сверлильных и измерительных циклов. Станочные циклы реализованы в виде параметризованных G-функций (токарные — G281—289; сверления — G81—89; фрезерные — G181—189; измерительные — G581—585), допускающих расширение со стороны пользователей. Использование циклов упрощает написание УП путем применения реализованных технологий для выточки, последовательной обработки отверстий, резьбонарезания, измерения параметров РИ или обработкиваемой заготовки [10].

4. Специализированные вспомогательные М-функции, необходимые для ОЦ, содержащих большое число единиц технологического оборудования: револьверные головки верхнего и нижнего суппортов; зажимные патроны; систему охлаждения РИ и МС; станцию охлаждения и гидростанция; транспортер стружки; защитное ограждение; систему подачи воздуха; инструментальный магазин; систему автоматической смены РИ и др.

Управление перечисленным набором технологического оборудования требует реализации ряда вспомогательных М-функций для: включения и выключения транспортера стружки (M50, M51); зажима и разжима патрона (M21, M22); открытия и закрытия защитного ограждения (M54, M55); управления перехватом детали противошпинделем (M75) и др.

Исходя из предъявляемых требований, разработана сетевая архитектура системы ЧПУ (рис. 2), в состав которой входят: машина реального времени (функционирующая в OS Linux) с ядром системы управления и интегрированным в нее программно-реализованным контроллером электроавтоматики типа SoftPLC; терминал оператора (состоящий из панели оператора на платформе .NET, стандартной станочной панели с опциональным подключением к ней маховичка и специализированной станочной панелью), подключенный к ядру по протоколу TCP/IP; модули расширения входов (выходов) для подключения электроавтоматики и линейных измерительных устройств; приводы главного движения и подачи; контроллеры шпинделя и противошпинделя.

Сбор и обмен данными в сети между вычислительными устройствами осуществляется на базе от-

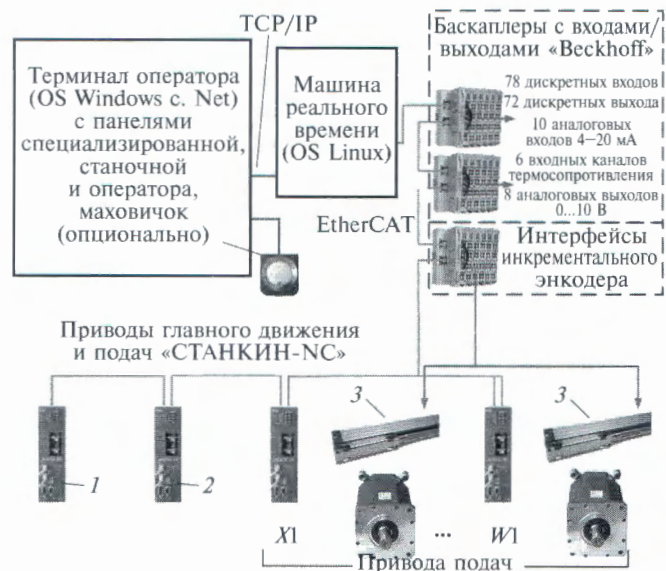


Рис. 2. Сетевая архитектура системы ЧПУ ОЦ мод. «НАКЛОН 535» (контроллер (1) шпинделя и (2) противошпинделя, 3 — измерительная линейка)

крытого высокоскоростного протокола EtherCAT. Большое число подключаемого к системе управления электрооборудования в проекте потребовало использования трех головных модулей ввода(вывода) (баскаптеры), что позволило распределить электрическую нагрузку между отдельными устройствами.

Баскаптеры расширены пассивными электронными модулями ввода(вывода) данных: 120 дискретных входов (пятнадцать восьмиканальных модулей), 48 дискретных выходов (шесть восьмиканальных модулей), 10 аналоговых входов (два четырехканальных модуля и один двухканальный модуль, 4—20 мА); 6 входных терминалов термосопротивлений (три двухканальных модуля); 9 аналоговых выходов (два четырехканальных и один одноканальный модуль, 0—10 В); 6 модулей интерфейса инкрементального энкодера.

В архитектуре программно-реализованного контроллера, управляющего электроавтоматикой выделены четыре составляющие: среда программирования; ядро SoftPLC; драйверы связи с внешними устройствами; сами физические устройства ввода/вывода.

Среда программирования (рис. 3) интегрирована в терминал системы ЧПУ и позволяет программировать электроавтоматику на языке функциональных блоков (FB) стандарта МЭК 61131. Про-

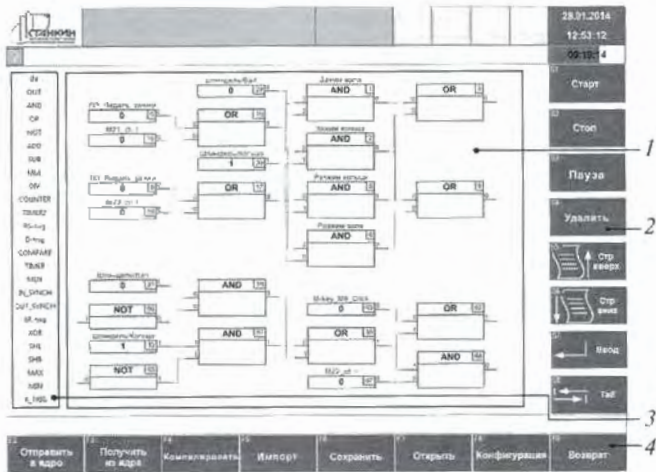


Рис. 3. Среда разработки УП SoftPLC: 1 – рабочая область программы; 2 – сервисные клавиши; 3 – функциональные блоки; 4 – клавиши

граммирование осуществляют в рабочей области. Функциональные клавиши позволяют: произвести компиляцию УП электроавтоматики; отправить или получить скомпилированный код из ядра контроллера; сформировать конфигурацию аппаратных модулей ввода(вывода); сохранить или открыть ранее сохраненную УП. Сервисные клавиши реализуют: пуск, паузу, останов УП в ядре контроллера; удаление функционального блока в УП; навигацию в рабочей области УП.

При программировании сложного электрооборудования МС, работающего с задержкой времени (таймеры) и счетчиками применяют временные диаграммы (циклограммы). В качестве примера проиллюстрирован запуск системы смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) на ОЦ наклонной компоновки мод. «НАКЛОН 535», соответствующей позиции 9 на циклограмме работы (рис. 4).

Ниже приведены сигналы циклограммы включения СОЖ. Определим зависимость функции



Рис. 4. Фрагмент циклограммы работы ОЦ мод. «НАКЛОН 535»

включения узла СОЖ $\Phi_{\text{СОЖ}}$ от других функций и сигналов, представленных на циклограмме. Сигналы электроавтоматики циклограммы работы СОЖ следующие: 1. $X_{\text{старт}}$ – сигнал начала работы; $X_{\text{стоп}}$ – сигнал окончания работы; $\Phi_{\text{ст}}$ – функция работы станка; $X_{\text{ошибка}}$ – сигнал возникновения ошибки; $X_{\text{шп}}$ – сигнал запуска шпинделя; $\Phi_{\text{СОЖ}}$ – функция запуска системы СОЖ.

Работа МС начинается с нажатием кнопки СТАРТ на станочной панели – сигнал ($X_{\text{старт}}$), после чего активируется реле с самоподхватом, отвечающее за работу станка (функция $\Phi_{\text{ст}}$). Процесс резания требует запуска шпинделя на станке (сигнал $X_{\text{шп}}$), при активации этого сигнала автоматически запустится система подачи СОЖ. В случае возникновения ошибки в работе станочного оборудования появляется сигнал $X_{\text{ошибка}}$, что приводит к отключению вращения шпинделя и подачи СОЖ. После устранения ошибки работа МС продолжится. Для вращения шпинделя необходимо активировать сигнал $X_{\text{шп}}$. Подача СОЖ прекращается через 3 секунды после остановки шпинделя. Задержка (в 3 секунды) необходима для гарантированного окончания процесса резания без нагрева обрабатываемой детали и РИ.

Программа реализации работы циклограммы на языке FBD приведена на рис. 5.

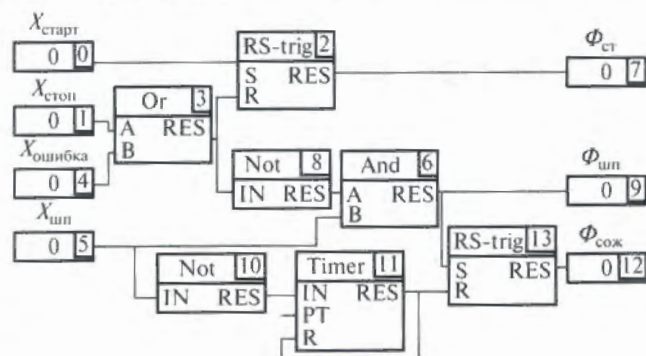


Рис. 5. Программа реализации включения СОЖ в среде SoftPLC

В заключение отметим, что на рынке востребованы станочные решения, базирующиеся на новых технологиях или схемах обработки и не позволяющие в полной мере применять для их управления универсальные системы ЧПУ из-за наличия специфических требований к отдельным режимам и процессу управления в целом.

Базовая вычислительная платформа систем ЧПУ «АксиОМАКонтроль» обладает достаточной

гибкостью и набором компонент для построения (на ее основе) специализированной системы управления новыми видами технологического оборудования. Создание специализированной системы ЧПУ для ОЦ наклонной компоновки на основе базовой вычислительной платформы заключается в дополнении набора станочных циклов, M-команд, в разработке УП электроавтоматики и экранов интерфейса оператора с учетом специфических особенностей разрабатываемого оборудования.

Интегрированный в системы ЧПУ программно-реализованный контроллер электроавтоматики позволяет разрабатывать и отлаживать УП, следить за изменением переменных, осуществлять диагностику состояния входов и выходов оборудования непосредственно на МС из специализированного режима терминала оператора системы управления.

Список литературы

1. **Mori Masahiko, Fujishima Makoto, Yohei Oda.** 5 axis mill turn and hybrid machining for advanced application // *Procedia CIRP* 1 (2012). — P. 22–27.
2. **Crichigno Filho, Joel Martins.** Prediction of cutting forces in mill turning through process simulation using a five-axis machining center // *International journal of advanced manufacturing technology.* — 2012. — V. 58. — I. 1–4. — P. 71–80.
3. **She Chen-Hua, Hung Chih-Wei.** Development of multi-axis numerical control program for mill-turn machine // *Proceedings of*

the institution of mechanical engineers part b-journal of engineering manufacture. — 2008. — V. 222. — I. 6. — P. 741–745.

4. **Григорьев С. Н., Мартинов Г. М.** Проблемы, тенденции и перспективы развития систем числового программного управления технологических систем и комплексов // *Автоматизация в промышленности.* — 2013. — № 5. — С. 4–7.

5. **Martinov G. M., Grigor'ev A. S.** Diagnostics of cutting tools and prediction of their life in numerically controlled systems // *Russian Engineering Research.* — 2013. — Т. 33. — № 7. — С. 433–437.

6. **Sergej N. Grigoriev, Georgi M. Martinov.** Scalable open cross-platform kernel of PCNC system for multi-axis machine tool // *Procedia CIRP* 1 (2012). — P. 255–260.

7. **Мартинова Л. И., Мартинов Г. М.** Практические аспекты реализации модулей открытой системы ЧПУ // *Автотракторное электрооборудование.* — 2002. — № 3. — С. 31–37.

8. **Georgi M. Martinov Aleksandr B. Ljubimov, Anton S. Grigoriev, Lilija I. Martinova.** Multifunction numerical control solution for hybrid mechanic and laser machine tool // *Procedia CIRP* 1 (2012). — P. 277–281.

9. **Мартинов Г. М., Мартинова Л. И., Козак Н. В., Нежметдинов Р. А., Пушков Р. Л.** Принципы построения распределенной системы ЧПУ технологическими машинами с использованием открытой модульной архитектуры // *Справочник. Инженерный журнал.* — 2011. — № 12.

10. **Martinova L. I., Grigoryev A. S., Sokolov S. V.** Diagnostics and forecasting of cutting tool wear at cnc machines // *Automation and Remote Control.* — 2012. — Т. 73. — № 4. — С. 742–749.

11. **Мартинова Л. И., Козак Н. В., Нежметдинов Р. А., Пушков Р. Л., Обухов А. И.** Практические аспекты применения отечественной многофункциональной системы ЧПУ «Акси-ОМАКонтрол». *Автоматизация в промышленности.* — 2012. — № 5. — С. 36–40.

12. **Метод декомпозиции и синтеза современных систем с ЧПУ.** Г. М. Мартинов, Н. В. Козак, Р. А. Нежметдинов и др. // *Автоматизация в промышленности.* — 2013. — № 5. — С. 9–15.

УДК 621.922

Прогнозирование износа абразивного зерна в результате физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом

к.т.н. Д. В. Ардашев

// Филиал Южно-Уральского государственного университета (НИУ), г. Кыштым, Челябинская обл. E-mail: dva79@inbox.ru

Аннотация. Одним из видов износа абразивного зерна, имеющим место при шлифовании, является физико-химический, вызванный интенсивным взаимодействием абразивного и обрабатываемого материалов. В статье предложена система коэффициентов химического сродства абразивного и обрабатываемого материалов, которая характеризует интенсивность протекания физико-химических процессов в зоне контакта этих материалов. **Ключевые слова:** химическое сродство, взаимодействие абразивного и обрабатываемого материалов, абразивное зерно.

Abstract. One of the types of wear of abrasive grains that take place during grinding is a physical-chemical, caused by the intense interaction of abrasive and machined materials. This article proposes a system of coefficients of the chemical affinity of the abrasive and

the materials characterizing the intensity of physical and chemical processes in the contact zone of abrasive grain and processed material. **Keywords:** chemical affinity interaction abrasive and work material, the abrasive grain.

Взаимное разрушение и постоянное обновление контактируемых поверхностей абразивного зерна (АЗ) и обрабатываемой заготовки, высокая контактная температура шлифования, соизмеримая с температурой плавления шлифуемого материала, процесс трения между площадкой затупления АЗ и об-