

## Концепция построения робототехнических комплексов для металлообработки и системы их инструментального обеспечения

### Building principles of robotic machining systems and their cutting tool system

*В статье обсуждаются подходы к построению высокоэффективных механообрабатывающих робототехнических комплексов, включая создание комплексов инструментального обеспечения и систем управления движением.*

*This paper considers general approaches to development the high-efficient robotic machining systems including the aspects of designing their cutting tool systems and motion control systems.*

**Ключевые слова:** робототехнический комплекс, инструментальная система, технологическая система, система управления.

**Keywords:** robotic machining system, cutting tool, cutting tool system, technological system, control system.

#### Введение

Робототехнические комплексы механообработки (РТК-М) предназначены для выполнения широкого круга основных технологических операций, сопровождающихся силовой реакцией на рабочий орган робота: фрезерования, сверления, шлифования, полирования, зачистки заусенцев, удаления облоя и др. РТК-М представляет собой технологическую систему, состоящую из промышленного робота, технологической оснастки, режущего инструмента и обрабатываемой заготовки.

РТК-М имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционно применяемыми для тех же операций многокоординатными обрабатывающими центрами с ЧПУ. Они обладают технологической гибкостью, возможностью обработки крупногабаритных изделий со сложной формой поверхности, просты в перенастройке, более дешевы. Основной недостаток — не очень высокая точность, обусловленная влиянием сил, возникающих при механообработке, и относительно низкой жесткостью манипуляторов роботов. Проектирование РТК-М как технологической системы является комплексной задачей с большим количеством параметров. Представляется актуальной задача формирования системы автоматизи-

рованного проектирования элементов РТК-М. При этом важны вопросы создания инструментального обеспечения РТК-М, формирования структуры системы, выбор робота, информационно-измерительных устройств и алгоритмов управления.

#### Структура технологической системы роботизированной механообработки

Обобщенная структурная схема технологической системы роботизированной механообработки приведена на рис. 1.

Исходными данными для системы автоматизированного проектирования РТК-М являются параметры обрабатываемой заготовки [1] и технические условия на изделие, получаемое в результате механической обработки. На основании этих данных определяют вид и значения режимов механической обработки, а также принципиальную схему компоновки РТК-М (рис. 2).

Алгоритм проектирования может выполняться по ветви 4—10 при заданных требованиях к режущему инструменту либо по ветви 11—16 при заданных требованиях к роботу. Блок 17 является блоком принятия решения.

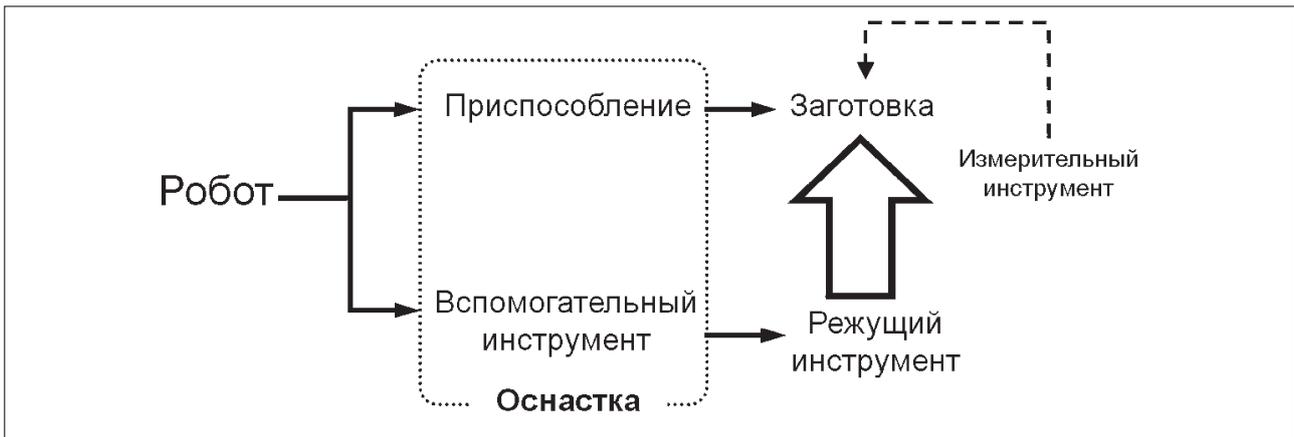


Рис. 1. Обобщенная структура РТК-М как технологической системы

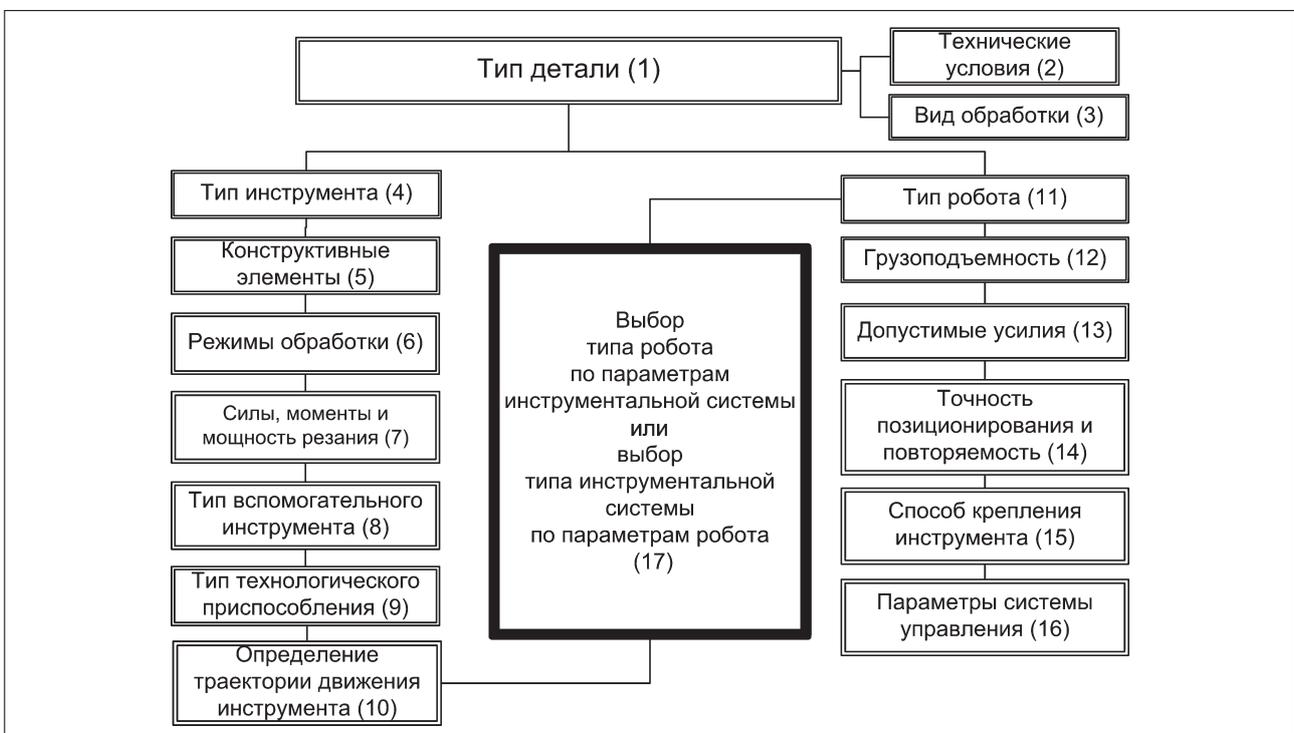


Рис. 2. Общая схема проектирования РТК-М и выбора технологических параметров процесса обработки

### Инструментальное обеспечение РТК-М

Для фрезерования в РТК-М чаще всего применяют концевые и дисковые фрезы. Заусенцы снимают абразивными головками, кругами и борфрезами. Для шлифования и полирования служат абразивные круги. Отверстия обрабатывают сверлами, зенковками и цековками, метчиками, развертками и комбинированным инструментом, в качестве которого можно применять, например, сверло-зенковку-метчик, инструмент с направляющей. Помимо этого, возможно использование РТК-М для «нестандартных» операций, среди которых обработка тел враще-

ния резцами, заточка режущего инструмента абразивными кругами, поверхностное упрочнение методом пластического деформирования.

При проектировании или выборе инструментальной системы для РТК-М руководствуются необходимостью снижения усилий резания и вибраций, возникающих в системе [2]. Экспериментальные исследования показали, что параметры режущей части инструмента и режимы обработки влияют на амплитуду возникающих вибраций, которую можно снизить при правильном выборе геометрии инструмента [3, 4]. С другой стороны, передний угол  $\gamma$  и главный угол в плане  $\phi$  режущего инструмента ока-

зывают существенное влияние на силу резания. Для повышения жесткости у инструментальной системы должны быть малые вылеты и биения, надо уменьшать люфт в шпинделе, использовать рациональные стратегии обработки, снижать массу элементов, увеличивать демпфирующую способность узлов за счет демпфирующих прокладок, изготавливать корпус инструмента из материала с большим декрементом затухания и применять виброгасители [5].

Главный угол в плане  $\varphi$  у фрез, предназначенных для РТК-М, надо выбирать с учетом того, что при его увеличении растет радиальная составляющая силы резания. Для обработки пазов и уступов следует применять крупный и/или неравномерный окружной шаг зубьев. При контурной обработке, а также обработке тонких стенок, целесообразно применять фрезы с малым и сверхмалым шагом зубьев [6, 7]. Глубокие канавки позволяют эффективно отводить стружку. Снижение массы инструмента может быть достигнуто за счет применения сборных конструкций со стальным или алюминиевым корпусом, изготовления корпусов методами аддитивных технологий. Для демпфирования колебаний рекомендуется применять инструмент с меньшими значениями угла  $\gamma$ . Износостойкие покрытия позволяют существенно снизить коэффициент трения в зоне обработки и силы резания [8].

Во избежание эффекта охвата фрезы и критического увеличения вибраций следует применять концевые фрезы минимально возможного диаметра, особенно при фрезеровании пазов. При обработке уступов диаметр фрезы должен быть на 20...50 % больше, чем ширина фрезерования. При большом вылете инструмента необходимо увеличить подачу на зуб и уменьшить глубину резания. Направление фрезерования существенно влияет на амплитуду вибраций. В общем случае рекомендуется применять попутное фрезерование на черновых и встречное на чистовых проходах [9, 10].

Следует отметить, что при обработке пазов значительные преимущества имеет трохоидальная обработка. В этом случае имеют место низкие радиальные усилия, минимальный отжим инструмента от обрабатываемой поверхности, хорошие условия эвакуации стружки и теплоотвода, что способствует снижению вибраций. Для обработки глубоких пазов можно использовать плунжерное фрезерование, при котором превалируют осевые нагрузки.

При обработке отверстий с помощью РТК-М инструмент должен обеспечить удовлетворительный отвод стружки. Следует применять сверло с минимально возможным вылетом, использовать жесткий и точный патрон с минимальным биением. Горизонтальное расположение оси отверстия способствует более эффективной эвакуации стружки. Для обработки отверстий большого диаметра можно ис-

пользовать кольцевые (трепанирующие) сверла или фрезерование методом винтовой интерполяции. Во многих случаях целесообразно применение СОЖ, что требует использования специального технологического оборудования.

#### Подход к повышению точности и производительности РТК-М

При создании РТК механообработки важно решить задачу достижения максимальной возможной производительности при соблюдении требования к точности обработки. Фактическая траектория движения инструмента, например, концевой фрезы, определяющая положение обработанной поверхности детали, может отличаться от желаемой. Причина — силы, сопровождающие механообработку и вызывающие тем большее отклонение инструмента  $\delta_T$ , чем больше значения контурной скорости движения инструмента и глубины резания. Изменения последней обусловлены, в частности, отклонением расположения поверхности детали от запрограммированного уровня. Таким образом, точность обработки и производительность оказываются взаимосвязанными.

Очевидно, что при создании РТК-М должно выполняться условие

$$\delta_T \leq \delta_{T, \text{доп}}, \quad (1)$$

где  $\delta_{T, \text{доп}}$  — допустимое отклонение инструмента. Увеличению точности механообработки способствуют такие известные в робототехнике меры, как калибровка робота, введение компенсирующих поправок в программу его движения с учетом податливости манипулятора, использование наиболее рациональной конфигурации, обладающей наибольшей жесткостью [11]. Однако этих мер часто бывает недостаточно, поэтому система управления РТК-М должна быть адаптивной. В каждый момент времени она должна устанавливать контурную скорость, максимально возможную с точки зрения обеспечения гарантированной точности обработки. Адаптивность достигается за счет использования аналитически задаваемых программных траекторий движения инструмента, зависящих от пути вдоль них. В этом случае появляется возможность вычислять путь, интегрируя по времени желаемую скорость движения [12, 13], которую определяют с учетом оценки  $\delta_T$  отклонения инструмента от желаемой траектории. Величину  $\delta_T$  рассчитывают по измеренным силам, действующим на инструмент, и коэффициенту динамической жесткости манипулятора технологического робота. Информация о силах поступает в систему управления РТК-М от датчика, установленного в «запястье» манипулятора, или значения вычисляют на основании данных от датчиков привода инструмента (рис. 3).

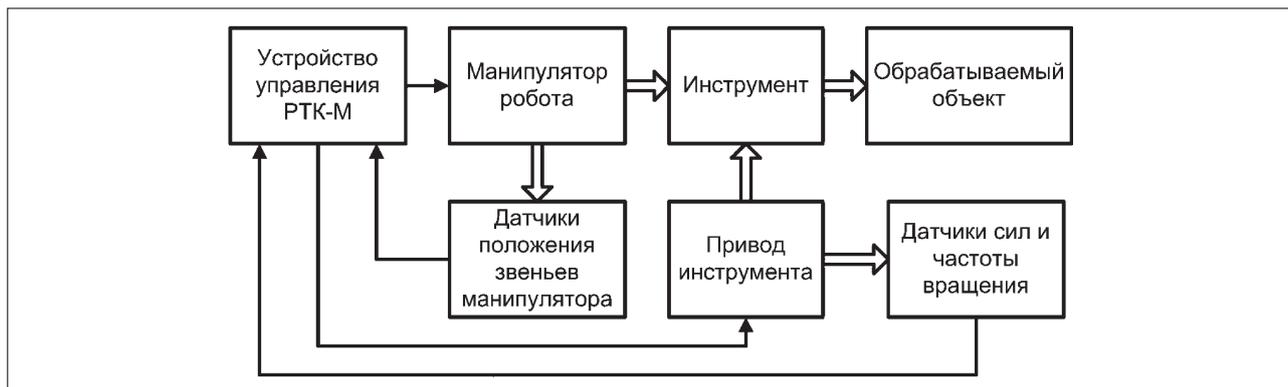


Рис. 3. Структура адаптивной системы управления РТК-М

Чем больше динамическая жесткость манипулятора, тем меньше  $\delta_T$ . Следовательно, по мере роста жесткости можно увеличивать скорость подачи, наращивая таким образом производительность механообработки. Однако возможности традиционного увеличения жесткости манипулятора путем изменения его механической части ограничены, этот путь ведет к росту металлоемкости конструкции, требуемой мощности приводов и снижению конкурентоспособности. Целесообразно строить системы управления РТК-М, обладающие способностью к увеличению динамической жесткости средствами регулирования при неизменной механической части.

Результаты исследования свидетельствуют, что наиболее сильно влияют на погрешность обработки упругость и люфт, присущие механическим передачам, входящим в состав приводов манипулятора. Для повышения точности и производительности РТК-М предлагается использовать траекторно-импедансное управление. Такое решение основано на применении комплекса двухдвигательных следящих приводов робота, замкнутых по положениям звеньев манипулятора и оснащенных средствами коррекции для предотвращения автоколебаний, обусловленных упругостью и люфтами механических передач [14, 15]. Для улучшения динамических свойств таких приводов рекомендуется применять корректирующие связи по скоростям движения звеньев манипулятора и по силам, действующим на рабочий орган. В результате существенно увеличивается динамическая жесткость манипуляторов и желаемым образом улучшается демпфирование движений инструмента в процессе механообработки.

#### Выводы

Предложенный подход к построению робототехнических комплексов механообработки служит основой для выбора их инструментального обеспечения и систем управления, обеспечивающих высокую

эффективность применения, достижение требуемой производительности и точности обработки. Разработанная схема проектирования элементов технологической системы является базой для создания и дальнейшего развития автоматизированных систем проектирования элементов РТК-М и технологической подготовки производства с применением роботизированных комплексов.

Дальнейшие исследования направлены на определение оптимальных режимов роботизированной механообработки, обеспечение виброустойчивости систем крепления режущего инструмента, поиск рациональных структур и алгоритмов приводов и систем управления технологическими роботами.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-58-78024 Итал\_а.*

#### Библиографический список

1. Kolesov N.V., Petukhov Yu.E. Computer models of cutting tools // Russian Engineering Research. 2007, Vol. 27. № 11. P. 812–814.
2. Исаев А.В., Козочкин М.П., Порватов А.Н. Вибродиагностика при металлообработке с помощью информационно-измерительных систем // Станочный парк. 2012. № 3. С. 25.
3. Гречишников В.А., Косарев Д.В., Косарев В.А. Снижение уровня вибраций при нарезании внутренних резьб резбовыми фрезами, оснащенными сменными твердосплавными пластинами // СТИН. 2010. № 6. С. 21–24.
4. Grechishnikov V.A., Domin P.V., Kosarev V.A., Petukhov Yu.E., Romanov V.B., Sedov B.E. Shaping by means of complex cutting tools // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34. № 7. P. 461–465.
5. Grechishnikov V.A., Kosarev V.A., Kosarev D.V. Milling internal thread with planetary tool motion // Russian Engineering Research. 2009. Vol. 29. № 11. P. 1177–1179.

6. **Исаев А.В., Козочкин М.П.** Применение информационно-измерительной системы для повышения точности обработки тонкостенных деталей на фрезерных станках с ЧПУ // Измерительная техника. 2013. № 10. С. 42—46.

7. **Isaev A.V., Kozochkin M.P.** Use of a measurement information system to increase the precision with which thin-walled parts are machined on numerically controlled milling machines // Measurement Techniques. 2014. Vol. 56. № 10. P. 1155—1161.

8. **Grechishnikov V.A., Kosarev D.V., Kosarev V.A.** Reducing the vibration when cutting internal threads by mills equipped with replaceable hard-alloy plates // Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30. № 9. P. 948—950.

9. **Исаев А.В., Козочкин М.П., Порватов А.Н.** Информационно-измерительная система для контроля вибраций при металлообработке // Метрология. 2011. № 8. С. 18—25.

10. **Исаев А.В., Порватов А.Н., Козочкин М.П.** Применение методов диагностики при отладке новых технологических процессов // Станочный парк. 2011. № 10. С. 16.

11. **Vorotnikov A.A., Bashevskaya O.S., Pyukhin Y.V., Romash E.V., Isaev A.V., Poduraev Y.V.** Geometrical approach for industrial robot axis calibration using laser

tracker, in: Annals of DAAAM for 2015 & Proceedings of the 26th International DAAAM Symposium, Editor B[ranko] Katalinic, Published by DAAAM International, Vienna, Austria, 2015.

12. **Илюхин Ю.В., Подураев Ю.В.** Повышение точности мехатронных приводов технологических роботов // СТИН, 2015. № 9, С. 30—37.

13. **Pyukhin Yu.V., Poduraev Yu.V., Tatarintseva A.V.** Nonlinear Adaptive Correction of Continuous Path Speed of the Tool for High Efficiency Robotic Machining // 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAAM, 2014. Procedia Engineering. 2015. Vol. 100. P. 994—1002.

14. **Воротников А.А., Подураев Ю.В., Ромаш Е.В.** Оценка погрешности определения центров вращения звеньев кинематической цепи для методики калибровки промышленных роботов // Измерительная техника. 2015. № 8. С. 23—28.

15. **Pyukhin Y.V., Kharchenko A.N., Arfikyan S.A.** Mechatronic electropneumatic servo drives // Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30. № 9. P. 964—966.

16. Справочник конструктора-инструментальщика / В.И. Баранчиков, Г.В. Боровский, В.А. Гречишников и др. — М.: Машиностроение, 1994. — 560 с.

**Гречишников Владимир Андреевич** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой инструментальной техники и технологии формообразования МГТУ «СТАНКИН».

Тел.: 8(499) 972-94-56. E-mail: ittf\_stankin@gmail.com

**Исаев Александр Вячеславович** — канд. техн. наук, доцент кафедры инструментальной техники и технологии формообразования МГТУ «СТАНКИН».

Тел.: 8(499) 972-94-56. E-mail: avisz@yandex.ru

**Илюхин Юрий Владимирович** — д-р техн. наук, проф. кафедры робототехники и мехатроники МГТУ «СТАНКИН».

Тел.: 8(499) 972-94-36. E-mail: ilyv\_178@mail.ru

**Пивкин Петр Михайлович** — преподаватель кафедры инструментальной техники и технологии формообразования МГТУ «СТАНКИН».

Тел.: 8(499) 972-94-56. E-mail: pmpivkin@gmail.com

**Воротников Андрей Александрович** — аспирант кафедры робототехники и мехатроники МГТУ «СТАНКИН».

Тел.: 8(499) 972-94-36. E-mail: aavorotnikov90@gmail.com

**Харченко Александр Николаевич** — руководитель учебно-научного центра ООО «Камоцци Пневматика».

Тел.: 8(916) 112-36-35. E-mail: хар4ehko@mail.ru

**Бьянки Джакомо Давиде** — руководитель отдела Института промышленных технологий и автоматизации Национального исследовательского совета Италии (ITIA CNR), Италия.

Тел.: +39 02 2369 9911. E-mail: giacomo.bianchi@itia.cnr.it

**Леонезио Марко** — научный сотрудник Института промышленных технологий и автоматизации Национального исследовательского совета Италии (ITIA CNR), Италия.

Тел.: +39 02 2369 9952. E-mail: marco.leonesio@itia.cnr.it

**Педрокки Никола** — научный сотрудник Института промышленных технологий и автоматизации Национального исследовательского совета Италии (ITIA CNR), Италия.

Тел.: +39 02 2369 9625. E-mail: nicola.pedrocchi@itia.cnr.it

**Тосатти Лоренцо Молинари** — ведущий научный сотрудник Института промышленных технологий и автоматизации Национального исследовательского совета Италии (ITIA CNR), Италия.

Тел.: +39 02 2369 9962. E-mail: lorenzo.molinari\_tosatti@itia.cnr.it

**Grechishnikov Vladimir Andreevich** — D. Sc. in Engineering, Full Professor, Head of the sub-department «Tool engineering and forming technologies» of MSTU «STANKIN».

Tel.: +7(495) 613-77-82. E-mail: ittf\_stankin@gmail.com

**Isaev Alexander Vyacheslavovich** — Candidate of Engineering Sciences, Assistant professor of the sub-department «Tool engineering and forming technologies» of MSTU «STANKIN».

Tel.: +7(916) 180-68-47. E-mail: avisz@yandex.ru

**Ilyukhin Yuri Vladimirovich** — D. Sc. in Engineering, Full Professor of the sub-department «Robotics and Mechatronics» of MSTU «STANKIN».

Tel.: +7(499) 972-94-36. E-mail: ilyv\_178@mail.ru

**Pivkin Petr Mihailovich** — Lecturer of the sub-department «Tool engineering and forming technologies» of MSTU «STANKIN».

Tel.: +7(499) 972-94-56. E-mail: pmpivkin@gmail.com

**Vorotnikov Andrey Alexandrovich** — postgraduate student of the sub-department «Robotics and Mechatronics» of MSTU «STANKIN».

Tel.: +7(499) 972-94-36. E-mail: aavorotnikov90@gmail.com

**Kharchenko Alexander Nikolayevich** — Head of Training and Research Centre of Camozzi Russia.

Tel.: +7(916) 112-36-35. E-mail: xap4ehko@mail.ru

**Bianchi Giacomo Davide** — Ph. D., Manager of the group «Dynamic Analysis and Simulation of Machinery», Institute of Industrial Technologies and Automation of National Research Council (ITIA CNR), Italy.

Tel.: +39 02 2369 9911. E-mail: giacomo.bianchi@itia.cnr.it

**Leonesio Marco** — researcher of Institute of Industrial Technologies and Automation of National Research Council (ITIA CNR), Italy.

Tel.: +39 02 2369 9952. E-mail: marco.leonesio@itia.cnr.it

**Pedrocchi Nicola** — researcher of Institute of Industrial Technologies and Automation of National Research Council (ITIA CNR), Italy.

Tel.: +39 02 2369 9625. E-mail: nicola.pedrocchi@itia.cnr.it

**Tosatti Lorenzo Molinari** — head researcher of Institute of Industrial Technologies and Automation of National Research Council (ITIA CNR), Italy.

Tel.: +39 02 2369 9962. E-mail: lorenzo.molinari\_tosatti@itia.cnr.it

---