

Брой 8/2025

АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ДИСКРЕТНОТО ПРОИЗВОДСТВО



ISSN: 2682-9584

Автоматизация на дискретното производство (АДП)

Машиностроителен факултет, катедра Автоматизация на дискретното
производство при Технически университет - София (ТУС) част от Европейски
технологичен университет (EUt+), София, България

Научни доклади от 34-та
Международна научно-техническа конференция

Автоматизация на дискретното производство 2025

Созопол, България
29 юни – 02 юли 2025

Редактор
проф. д-р инж. Ренета Димитрова
Технически университет - София, България

*С партньорството на Национално издателство
за образование и наука "Аз-буки"*

АЗ·БУКИ

София, 2025

Научни доклади от 34-та

Международна научно-техническа конференция

Автоматизация на дискретното производство 2025

Website: <https://mf.tu-sofia.bg/mntkadp/bg/home/>

Редактор:

проф. д-р инж. Ренета Димитрова

Технически университет - София, България

Отпечатване: Национално издателство за образование и наука "Аз-буки"

ISSN: 2682-9584

От 1998 г. катедра АДП ежегодно провежда Международна научно-техническа конференция "Автоматизация на дискретното производство" в рамките на Дни на науката на ТУ-София част от Европейски технологичен университет (EUt+). В конференцията участват водещи учени от България и чужбина. Провежда се специална сесия, на която се представят иновативни разработки на студенти и млади учени. Организира се представяне на фирми, работещи в областта на автоматизираното дискретно производство и мехатрониката. В рамките на конференцията се провежда кръгла маса, на която се обсъждат актуални въпроси и проблеми на образованието, науката и бизнеса.

Конференцията се организира от катедра „Автоматизация на дискретното производство” към Машиностроителен факултет на Технически университет – София. Тематиките на конференцията са в областта на мехатрониката, автоматизацията и роботизацията на дискретното производство. Разграничават се девет основни научни направления:

-  Теоретични проблеми на автоматизацията на дискретното производство
-  Технологии и машини за автоматизираното дискретно производство
-  Автоматизиране потока на детайлите
-  Промислени работи и роботизирани комплекси
-  Автоматизация на монтажа
-  Мехатроника
-  Системи за управление в дискретното производство
-  Иновации и инженеринг на автоматизираното дискретно производство
-  CAD/CAM/CAE системи и виртуално инженерство

За XXXIV Международна научно-техническа конференция " Автоматизация на дискретното производство 2025" (XXXIV МНТК "АДП 2025"), от 29 юни до 02 юли в гр. Созопол са приети 35 бр. научни доклада от 65 автора, 20 бр. от които са предложени за публикуване в Web of Science. Останалите научни доклади са публикувани в настоящия бр.8/2025 на списание „Автоматизация на дискретното производство“. Общо 15 бр. пленарни доклади, 7 бр. в първо пленарно заседание и 8 бр. във второ пленарно заседание и 20 бр. постерни доклади, 10 бр. в първо постерно заседание и 10 бр. във второ постерно заседание.

Програмен комитет

Председател

проф. дн Иво Малаков - Технически университет - София

Членове

проф. дн Иван Кралов - Технически университет - София

проф. д-р Любомир Димитров - Технически университет - София

проф. д-р Димитър Дамянов - Технически университет - София

проф. д-р Стефан Къртунов - Технически университет - Габрово

проф. дн Васил Костадинов - РУ "Ангел Кънчев"

проф. дн Христо Шехтов - Лесотехнически университет

проф. д-р Роман Захариев - Българска Академия на Науките

проф. д-р Сийка Демирова - Технически университет - Варна

проф. д-р Властимир Николич - Нишки университет

проф. д-р Хоакин Франциско Рока Гонзалез - Политехнически университет -
Картаген

проф. д-р Шабан Буза - Университет Прищина

проф. д-р Раме Ликай - Университет Прищина

проф. д-р Уве Фюсел - Технически университет - Дрезден

проф. д-р Каха Деметрашвили - Технически университет - Тбилиси

проф. д-р Петр Лоуда - Технически университет - Либерец

проф. д-р Симеон Симеонов - Технически университет - Брно

проф. д-р Ненад Павлович - Нишки университет

проф. д-р Виктор Гавриловски - Университет Скопие

проф. д-р Александър Марковски - Университет Битоля

проф. д-р Александър Михайлов - Донецки университет

проф. д-р Николай Стоименов - Българска Академия на Науките

доц. д-р Селухатин Косуналп - Йоркски университет

доц. дн Марина Черпинска - Технически университет - Рига

доц. д-р Дан Стан - Технически университет - Ключ-Напока

доц. д-р Овидиу Петру Стан - Технически университет - Ключ-Напока

доц. д-р Милош Симонович - Нишки университет

доц. д-р Катерина Чернякова - Държавен изследователски институт Вилнюс

доц. д-р Игор Врублевский - Беларуски държавен университет

Организационен комитет

Председател

проф. д-р инж. Ренета Димитрова - Ръководител катедра АДП

Научен секретар

проф. д-р инж. Силиян Николов - Декан на МФ

Членове

проф. дн Иво Малаков - АДП, ТУ-София

проф. д-р Панчо Томов - АДП, ТУ-София

доц. д-р Ваня Георгиева - АДП, ТУ-София

доц. д-р Татяна Андонова-Вакарелска - ТКС, ТУ-София

доц. д-р Михаела Топалова - ИПФ, ТУ-София

доц. д-р Велизар Захаринов - АДП, ТУ-София

Секретариат

гл. ас. д-р Слав Димитров - АДП, ТУ-София

гл. ас. д-р Боян Бахчеванов - АДП, ТУ-София

гл. ас. д-р Димитър Тотев - АДП, ТУ-София

This conference has been held with financial support by the European Regional Development Fund within the Operational Programme “Bulgarian national recovery and resilience plan”, procedure for direct provision of grants “Establishing of a network of research higher education institutions in Bulgaria”, and under Project BG-RRP-2.004-0005 “Improving the research capacity and quality to achieve international recognition and resilience of TU-Sofia (IDEAS)”.

The Microsoft CMT service was used for managing the peer-reviewing process for this conference. This service was provided for free by Microsoft and they bore all expenses, including costs for Azure cloud services as well as for software development and support. All papers are double-blind peer reviewed.

The Organizing Committee thanks the Research and Development Sector at the Technical University of Sofia and the companies VANIKO OOD - Blagoevgrad, KMS Engineering OOD - Plovdiv and Logisoft OOD - Sofia for their financial support in holding the conference. The Organizing Committee thanks all participants for the timely submission of scientific reports and compliance with the conference requirements.

Фирма „Ванико“ ООД - Благоевград



Фирма „Логисофт“ ООД - София



Фирма „КМС Инженеринг“ ООД - Пловдив



СЪДЪРЖАНИЕ:**Технологии и машини за автоматизираното дискретно производство**

1. Проектиране на нискостойностна система за шприцоване на малобааритни детайли

Анна-Мария Лазарова, Ренета Димитрова 9

2. Сравнителен анализ на технологични процеси за производство на малобааритни неметални детайли

Анна-Мария Лазарова, Стилиян Николов..... 18

3. Investigating the roughness of 3D printed polymer samples

Miglena Paneva, Peter Panev, Gabriela Kotseva..... 27

Промислени работи и роботизирани комплекси

1. Collaborative off-road robot with hydrogen fuel cell for healthcare

Roman Zahariev, Nina Valchkova 35

2. Engineering study of the positioning accuracy of modules for industrial robots

Tatyana Vakarelska, Izabela Radkova 44

Мехатроника

1. Обзор на крачеци работи в зависимост от броя на краката

Алдин Хаджиев 52

2. Хибридно управление на протеза за горен крайник

Йото Йотов, Емил Петров 62

Системи за управление в дискретното производство

1. Main challenges for integration of Industry 5.0 principles in existing systems for automation and control of industrial and manufacturing processes

Dimitar Totev 70

2. Modernization the controlling of automated mechatronic system for cutting eco-briquettes

Slav Dimitrov 77

3. Анализ на съществуващите решения в областта на взаимодействието между институциите при киберинциденти

Иван Христозов, Веселина Александрова, Чавдар Костадинов, Иван Чакъров 85



Иновации и инженеринг на автоматизираното дискретно производство

1. Създаване и моделиране на система за управление на качеството в автоматизирано производство

Петър Маринов..... 93

2. Dynamic modeling of a quality management system in automated production

Petar Marinov..... 103

3. Innovative solutions for increasing the reliability of platter ski lift facilities

Aleksander Vukov, Milena Haralampieva, Rosen Petrov 112

4. Digital twins for threat simulation and intelligent defense strategies in automated discrete manufacturing

Roumiana Ilieva, Gloria Stoilova 123

CAD-CAM-CAE системи и виртуално инженерство

1. Постпроцесиране при използване на CAM системи за генериране на управляващи програми за CNC машини за лазерно рязане

Стилиян Николов, Боян Бахчеванов..... 131

Автори 140

ПРОЕКТИРАНЕ НА НИСКСТОЙНОСТНА СИСТЕМА ЗА ШПРИЦОВАНЕ НА МАЛОГАБАРИТНИ ДЕТАЙЛИ

Анна-Мария Лазарова

Технически университет – София, България

Ренета Димитрова

Технически университет – София, България

Резюме. Настоящият доклад разглежда проектирането на нискостойностна система за шприцоване на малогабаритни детайли. Целта на нискостойностната система е за кратък период от време да се произведат голям брой малогабаритни детайли. Концептуалният модел на системата е разработен така, че да отговаря на зададените първоначални условия за производство на малогабаритни детайли при спазване на всички ограничения на технологичния процес и ниска цена.

Ключови думи: нискостойностна система, шприцоване, малогабаритни детайли, проектиране

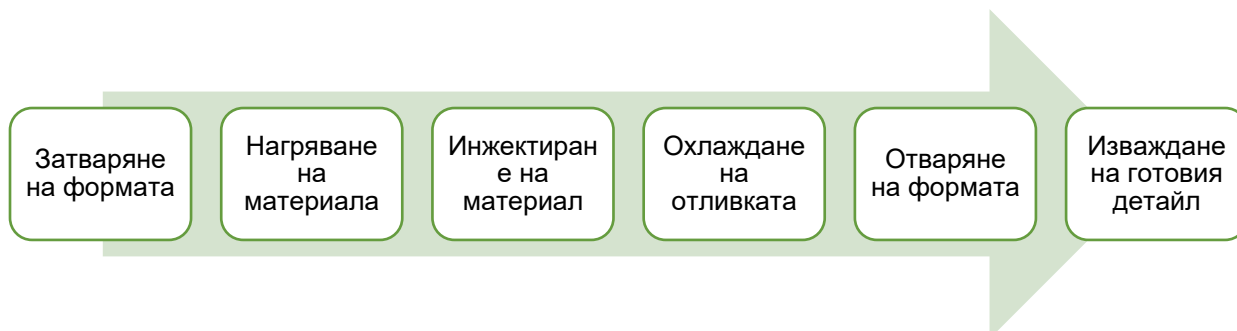
Увод

Инжекционното шприцоване на пластмаса е високоразвит технологичен процес, на база на производствения процес леене под налягане (Nikolov, 2022). Основното му предназначение е серийно производство на пластмасови изделия с различни форми и размери. Тази технология е широко разпространена в индустрията и намира приложение в автомобилостроене, електроника, машиностроене, медицина, фармация, опаковъчна индустрия и други сектори на индустрията (Vipes Industrial Automation Ltd, 2025; Zaharinov, 2023; Dichev, 2021; Dichev, 2024). Процесът включва нагряване на полимерен материал до течено състояние, след което той се впръсква под високо налягане в предварително изработена форма. Следва охлаждане и материала придобива зададената форма като от матрицата се отделя готовия продукт. Чрез инжекционното шприцоване могат да се произвеждат изделия с висока точност на размерите, отлични механични свойства и минимален процент на брак. (Engineering-review, 2025). Сред ключовите предимства на инжекционното шприцоване са висока производителност, възможност за повтаряемост, добра повърхностна обработка на детайлите и широк спектър от използвани материали. Технологията осигурява ефективност в производствения процес и позволява масово производство на пластмасови детайли с високо качество и ниски разходи (Malakov, 2014; Malakov, 2023; Tomov, 2017; Vassilev, 2024).

1. Особенности на технологичния процес

Технологичният процес включва няколко основни стъпки, показани на фиг. 1. Процесът започва със затваряне на формата, след което се подава пластмасов материал (прах или гранули) в хранящо устройство на машината за инжекционно шприцоване. Подаденият материал се нагрява и разтопява, след което чрез винт на машината за инжекционно шприцоване разтопеният пластмасов материал се изтласква през дюза за шприцоване с високо налягане и се инжектира в празното пространство на формата.

Следва охлаждане на формата, като по този начин се произвежда готовия детайл във формата, която матрицата дава. Изваждането на готовия детайл се извършва чрез отваряне на формата след приключване на охлаждането.



Фиг. 1. Основни стъпки на технологичния процес

Основен влияещ фактор за производство на качествен детайл чрез този технологичен процес е термичното свиване на материала. При охлаждане, пластмасовите материали променят своите размери и по тази причина, условията на шприцоване са различни за всеки материал. За да се постигне високо качество на един детайл, при проектиране на формата е необходимо да се отчитат коефициентите на свиване в зависимост от използвания материал. (Deep Mold Co. Ltd, 2025).

2. Съществуващи машини за шприцоване на пластмаса

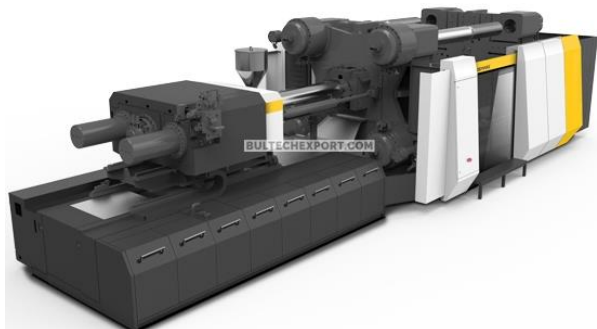
На фиг. 2 е показан пример на съществуваща машина за шприцоване на пластмаса на фирма KCLKA модел EK16-12P PVC. (Kclka Machine Manufacture Co. Ltd, 2025). Друг пример на фирма FANUC модел ROBOSHOT αS100iA е показан на фиг.3, а на фиг.4 е показан модел на машина за шприцоване на фирма BULTECHEXPORT - модел BTE226 (Bultechexport, 2025; Injection molding machine with servo drive BTE226).



Фиг. 2. KCLKA инжекционна машина - модел EK16-12P PVC



Фиг. 3. FANUC инжекционна машина - модел ROBOSHOT αS100iA



Фиг. 4. BULTECHEXPORT инжекционна машина - модел BTE226

Най-малките машини за шприцоване са предназначени за производство на малки пластмасови детайли или за лабораторни цели. Те обикновено имат сила на затягане от около 5 до 20 [t] и са компактни по размери. Например машините на фирма BULTECHEXPORT от серията BTE330 са предназначени за малки производствени серии и прототипиране. На фиг. 5 е показана малогабаритна машина за шприцоване (Bultechexport, 2025; Mini injection molding machine BTE330).



Фиг. 5. Машина за шприцоване BULTECHEXPORT - модел BTE330

Най-големите машини за шприцоване се използват за производство на големи пластмасови изделия, като автомобилни брони, контейнери и др. Те имат сила на затягане от няколко хиляди тона. Пример за такава машина, е моделът ROBOSHOT α-S450iA на фирма FANUC, предназначен за производство на големи пластмасови изделия, показана на фиг. 6 (Fanuc, 2025).



Фиг. 6. Машина за шприцоване FANUC -модел ROBOSHOT α-S450iA

Сравнение на основните параметри на показаните по-горе машини за шприцоване са показани в табл. I.

Таблица I. Сравнителен анализ на параметрите

Параметър	Дименсия	KCLKA	FANUC	BULTECH EXPORT
Диаметър на винта	mm	65	22	70
Скорост на винтовете	r/min	-	300	166
Инжекционно налягане	Mpa	13,73	260	228
Теоретичен обем на шприцоването	cm ³	785	29	1478
Тегло на шприцоването (ps)	g	1,1	25,2	1330
Скорост на шприцоване	cm ³ /s	-	50	406
Сила на затягане	KN	588,4	1000	5884
Затягащ ход	mm	-	350	900-1450
Дебелина на формата	mm	280		350-900
Разстояние между прътите	mm	-	560x510	880x880
Размер на плочата	mm	460*220*280	660x610	616x616
Ежекторна сила / стъпка	KN/mm	-	0,25	-
Тегло на машината	t	5,8	4,4	7
Размери на машината	mm	4500*3530*2100	1700x1950x4100	-

Направеният сравнителен анализ на параметрите на разгледаните машини показва, че има много и различни фирми, произвеждащи различни типоразмери машини и оборудване за шприцоване със сходни основни параметри в зависимост от големината на крайният готов детайл. Една такава машина за шприцоване е не малка инвестиция, която повишава крайната цена на единица произведена продукция. Поради тази причина целта на настоящата разработка е да се проектира нискостойностна система за шприцоване, която да се използва за производство на сравнително малки неметални детайли при спазване на всички изисквания на технологичния процес, постигане на високо качество на произведените детайли и ниска цена на единица продукция.

3. Проектиране на нискостойностна система за шприцоване

При проектирането на нискостойностната система за шприцоване са отчетени следните особености:

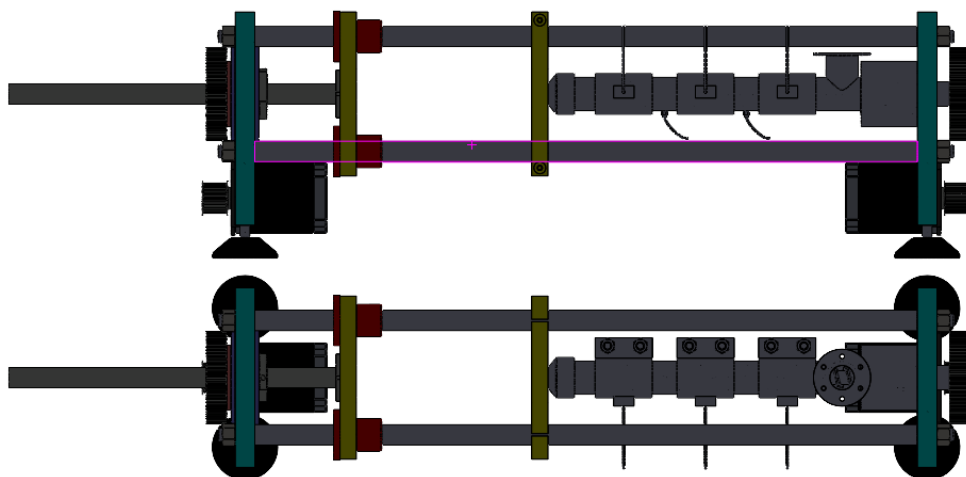
- Необходимо е детайла да има подходящи технологични наклони на изваждане (между 0,5° и 3°) спрямо посоката на отваряне на формата, което улеснява изваждането на готовия детайл.

- Делителните линии представляват ръбовете на детайла, по които се разделят отделните елементи на формата. Те се създават след като се моделира детайла, заедно с предвидените наклони, като е съобразен и коефициентът на свиване на материала.
- Делителните повърхнини започват от делителната линия и са разположени перпендикулярно на посоката в която се изважда готовия детайл. Те играят ключова роля при отделянето на различните формообразуващи елементи.

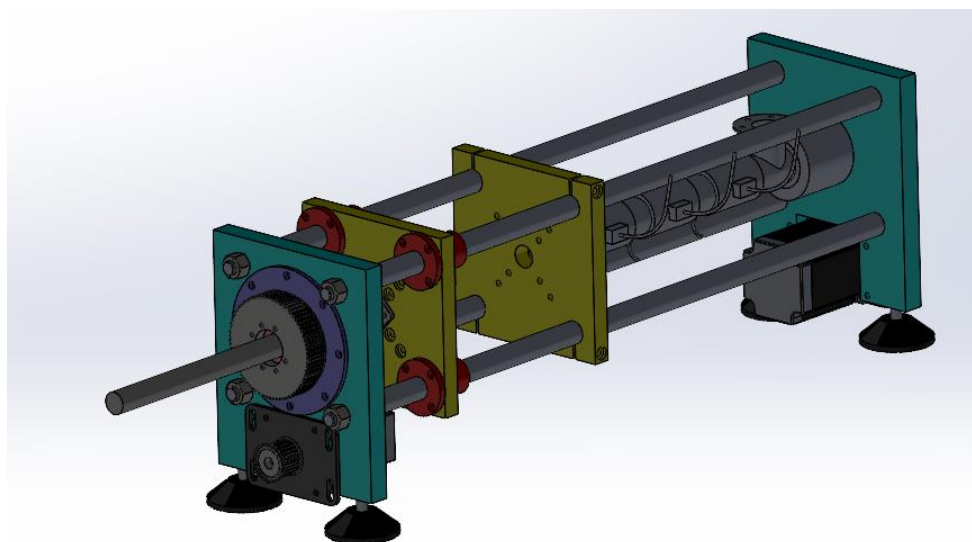
Тези фактори гарантират, че детайлите ще бъдат прецизно проектирани и произведени без дефекти. На фиг. 8 е показан 3D модел на проектираната нискостойностна система за шприцоване при зададените първоначални условия:

- Работна зона от 150 [mm] до 150 [mm].
- Размери на готовите детайли от 70 [mm] до 70 [mm].

Габаритните размери на системата са 1000 [mm] на 260 [mm]. Крайните плочи са с размери 220 [mm] на 260 [mm], а вътрешните плочи са с размери 200 [mm] на 200 [mm]. Предвидени са стъпкови двигатели с голям въртящ момент.

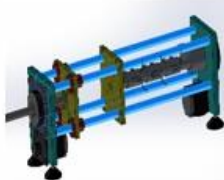
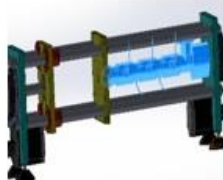
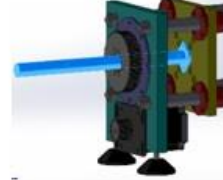
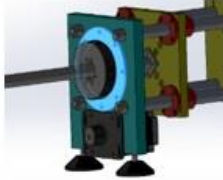
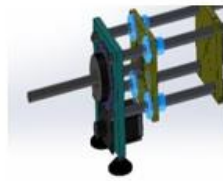
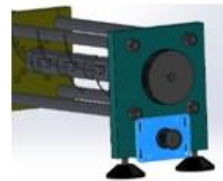
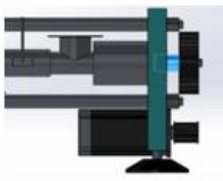
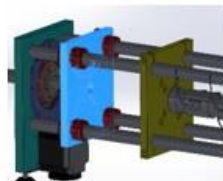
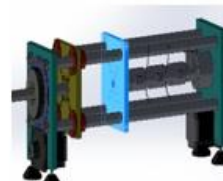
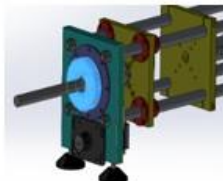
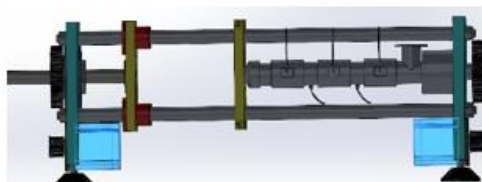
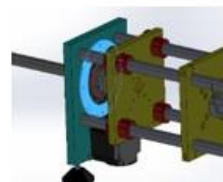
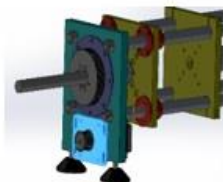


Фиг. 7. Характерни изгледи на проектираната нискостойностна система за шприцоване



Фиг. 8. 3D модел на проектираната нискостойностна система за шприцоване

Таблица II. 3D модели на структурните елементи

Елемент	Направляващи	Винт (шнек)	Валцован сачмен винт	Преден фланец
3D модел				
Елемент	Сачмена гайка	Линейни лагери	Планка за двигател	Дистанционна втулка
3D модел				
Елемент	Зъбна шайба	Подвижна плоча	Неподвижна плоча	Зъбна шайба
3D модел				
Елемент	Двигатели		Заден фланец	Планка за двигател
3D модел				

Основните структурни елементи на нискостойностната система са:

- направляващи;
- винт;
- валцован сачмен винт;
- двигатели;
- преден и заден фланец;
- линейни лагери;
- планки за двигателите;
- дистанционна втулка;
- зъбна шайба;

- подвижна и неподвижна плочи;
- сачмена гайка.

Работната зона на нискостойностната система за шприцоване е пространството във формата (матрицата), която се намира между подвижната и неподвижната плочи. Неподвижната плоча е свързана с винт (шнек), който е проектиран да шприцова необходимият материал до 15 [g], за да се изпълни проектираната форма (матрица).

Проектирана е и система за отстраняване на готовия детайл от формата (матрицата). Тя се състои от пружина, планка и ежектор. Броят на ежекторите в системата съответства на броя на детайлите, които ще се шприцоват. В така проектираната форма (матрица) на нискостойностната система могат да се изработят един, два, три и дори повече детайли в зависимост от големината на габаритните им размери.

Тази възможност повишава значително производителността на системата. За подобряване производителността и качеството на детайлите в така проектираната система се внедряват нагревателна и охлаждаща система.

4. Изводи

Машините за шприцоване на неметални детайли и изделия играят съществена роля в съвременното производство. Те осигуряват висока ефективност и качество при изработката на пластмасови изделия. Технологиите на инжекционно шприцоване позволява масово производство на детайли с висока прецизност, минимален брак и отлични механични свойства.

С развитието на новите технологии, модерните машини за шприцоване стават все по-енергоефективни и прецизни, което допринася за оптимизиране на производството и разходите. Тази технология не само улеснява производството на пластмасови детайли, но и осигурява висока степен на повтораемост и качество, което я прави ключов фактор в индустриалното развитие.

REFERENCES

- Bultechexport, (2025). Injection molding machine with servo drive BTE226 [viewed 10 March 2025]. (in Bulgarian). Available from: <https://bultechexport.com/oborudovaniya/item/shprints-mashini-sas-servo-zadvizhvane-bte226/>
- Bultechexport, (2025). Mini injection molding machine BTE330 [viewed 10 March 2025]. (in Bulgarian). Available from: <https://bultechexport.com/oborudovaniya/item/mini-shprints-avtomat-bte330/>
- Deep Mold Co. Ltd, (2025). Precision Injection Molding [viewed 10 March 2025] (in Bulgarian). Available from: <https://bg.deepmould-fr.com/precise-injection-molding/>
- Dichev, D., Diakov, D., Dicheva, R. (2021). Method for increasing the accuracy of linear measurements based on a measurement-computational approach. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2505, Code 182583, DOI: 10.1063/5.0101084
- Dichev, D., Diakov, D., Zhelezarov, I., Valkov, S., Ormanova, M., Dicheva, R., Kupriyanov, O. (2024). A method for correction of dynamic errors when measuring flat surfaces. *Sensors*. Vol. 24, issue 16, DOI: 10.3390/s24165154
- Engineering-review, (2025). Runner Systems for Plastic Injection Molding, *Engineering Review Magazine – Issue 2/2022 (11.04.2022)* [viewed 17 March 2025]

- 2025]. (in Bulgarian). Available from: <https://www.engineering-review.bg/bg/leyakovi-sistemi-za-shpritsvane-na-plastmasi/2/4703/>
- Fanuc, (2025). ROBOSHOT α -SiA series, High Precision Electric Injection Moulding [viewed 17 March 2025]. (in Bulgarian). Available from: <https://www.fanuc.eu/bg/bg/roboshot>
- Kclka Machine Manufacture Co., Ltd. (2025). PVC Sandals Injection Making Machine [viewed 15 March 2025]. (in Bulgarian). Available from: <https://www.chinakclka.com/air-blowing-injection-molding-machine/pvc-sandals-injection-making-machine.html>
- Malakov, I., Zaharinov, V., Nikolov, S., Dimitrova, R. (2023). Computer-aided choosing of an optimal structural variant of a robot for extracting castings from die casting machines, *Journal Actuators*, Volume 12, Issue 9 Article number 363, DOI:10.3390/act12090363
- Malakov, I., Zaharinov, V. (2014). Computer Aided Determination of Criteria Priority for Structural Optimization of Technical Systems. *24th DAAAM International symposium on intelligent manufacturing and automation*. Vol. 69, pp. 735 – 744, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.049>
- Nikolov S., Dimitrova, R., Malakov, I., Zaharinov, V., Stambolov, G. (2022). Generalized assessment of the technical parameters of industrial robots for extraction of castings from high-pressure casting machines, *AIP Conference Proceedings*, Volume 24491, Article number 020017, DOI:10.1063/5.0090657
- Tomov, P. (2017). Increasing the efficiency of automation of production processes by reporting the parameters of the parts' flow. *TEM Journal*. Vol.6, Issue 3, pp. 484 - 487, DOI: 10.18421/TEM63-08.
- Vassilev, V., Komarski, D. (2024). Retrofit of a Roundness Measuring Instrument. *34th International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance*. Code 205732, DOI: 10.1109/MMA62616.2024.10817687.
- Vipes Industrial Automation Ltd. (2025). Structure and Operating Principle of an Injection Molding Machine for Thermoplastic Materials, [viewed 15 March 2025]. (in Bulgarian). Available from: <https://injectionmouldingmachines.biz/shpritz-presi-za-plastmasa/>
- Zaharinov V., Malakov, I., Nikolov, S., Dimitrova, R., Stambolov, G. (2020). Classification of parts used in mechatronic products and produced by permanent-mold casting methods, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 878, Issue 121, Article number 012063, DOI:10.1088/1757-899X/878/1/012063

DESIGN OF A LOW-COST SYSTEM FOR INJECTION MOLDING OF SMALL PARTS

Abstract. This report examines the design of a low-cost injection molding system for small-sized parts. The goal of the low-cost system is to produce a large number of small-sized parts in a short period of time. The conceptual model of the system is developed to meet the initial conditions for the production of small-sized parts while respecting all the limitations of the technological process and at low cost.

Keywords: low-cost system, injection molding, small parts, design



Assist. Prof. Anna-Maria Lazarova, Eng

ORCID iD: 0009-0009-3104-2901

Web of Science Researcher ID: MTG-3577-2025

Technical University of Sofia

Sofia, Bulgaria

E-mail: lazarova990@gmail.com

Prof. Reneta Dimitrova, PhD

ORCID iD: 0000-0001-6594-131X

Web of Science Researcher ID: GWZ-2447-2022

Technical University of Sofia

Sofia, Bulgaria

E-mail: rkd@tu-sofia.bg

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРОЦЕСИ ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА МАЛОГАБАРИТНИ НЕМЕТАЛНИ ДЕТАЙЛИ

Анна-Мария Лазарова

Технически университет – София, България

Стилиян Николов

Технически университет – София, България

Резюме. Настоящата статия разглежда различните технологични процеси за производство на малобагаритни неметални детайли. Направен е сравнителен анализ на двата най-често използвани за целта технологични процеса, 3D принтиране и инжекционно шприцоване. Анализът е фокусиран върху ефективността, точността, разходите и приложимостта на процесите. Представени са съществуващи машини за разглежданите технологични процеси на различни водещи производители.

Ключови думи: технологичен процес, малобагаритен детайл, производство, 3D принтиране, инжекционно шприцоване

1. Увод

Технологията може да бъде дефинирана като приложение на науката за осигуряване на обществото и неговите членове с онези неща, които са необходими или желани. Тя засяга ежедневието ни пряко и непряко, по много начини. Технологичният процес е част от производствения процес, представляваща съвкупност от взаимосвързани действия за изменение на качествено състояние на обработваното изделие. Той може да бъде свързан с различни етапи от производството на дадено изделие (Groover, 2013).

В настоящия момент съществуват разнообразни технологии и технологични процеси за производство изделия, и за тяхната автоматизация и роботизация (Dimitrova, 2024; Dimitrova, 2019). В съвременното производство на малобагаритни неметални детайли се използват различни технологични процеси, които имат своите предимства и недостатъци. Изборът на подходящ технологичен процес зависи от множество фактори, като точност, производителност, себестойност на произвежданата продукция и приложението на готовото крайно изделие и др.

Настоящата статия има за цел да разгледа основните технологии за производство на малобагаритни неметални детайли. Това са технологиите 3D принтиране и инжекционно шприцоване. Чрез анализ на техните особености, като ефективност и приложимост в различни производствени процеси, се определят оптималните условия за избор на технология за производство на малобагаритни неметални детайли, която отговаря на специфичните изисквания за качество, разходи и функционалност.

2. 3D принтиране

3D принтирането, е добило популярност название на група технологични процеси, част от технологията за адитивно производство. То е сложен процес, който включва създаване на дигитален CAD модел и неговото отпечатване като реален триизмерен обект.

Адитивно производство, включва изработване на 3D твърди детайли от предварително създаден дигитален модел. Детайла се изгражда постепенно, чрез нанасяне на необходимия брой слоеве от избрания материал един върху друг. Повечето 3D технологии следват този принцип, като дебелината на слоевете обикновено варира между 16 и 180 μm , в зависимост от конкретния детайл. Важно е да се отбележи, че адитивното производство не е единна технология, а обединение от различни производствени процеси. Макар и да се различават един от друг, те споделят три основни характеристики:

- работят чрез добавяне на материал, необходим за изграждането на 3D обекта;
- изграждат обекта чрез последователно наслагване на слоеве;
- всеки изграден обект е създаден на базата на дигитален 3D модел.

Тези характеристики правят адитивното производство иновативен и гъвкав метод за създаване на физически продукти.

Времето за изработка на детайла, варира от няколко часа до няколко дни, в зависимост от сложността му. 3D принтираните детайли и изделия намират приложение в много и различни индустрии – от архитектура и продуктов дизайн до космическа индустрия и медицина (3DBGPRINT Ltd, 2025). Бурното развитие на тази технология през последните години я прави предпочитана за производство на разнообразни детайли от различни неметални материали.

Съществуват настолни 3D принтери, които са компактни и предназначени за изработка на малки до средни по размери детайли. Те могат да 3D принтират детайли с размери от 200 [mm] до 600 [mm], като по-големите размери се постигат с модели на 3D принтери като Raise3D Pro3 Plus. За детайли с размери над 600 [mm] се използват широкоформатни 3D принтери като BigRep и Omni3D. На практика, с помощта на тази технология могат да се изработват детайли и изделия с всякакви размери и разнообразни форми.

Процесът на 3D принтиране преминава през няколко ключови етапа, които гарантират качественото производство:

2.1. Създаване на дизайна

Първата стъпка е разработване на дигитален 3D модел, който служи като основа за принтирането. В този етап се определят материала, формата и метода на производство спрямо предназначението на детайла. Модела се създава със CAD софтуер, като това е дигиталната проекция на бъдещия физически обект.

2.2. Подготовка на 3D модела и принтера

След като дизайнът е готов, моделът се подготвя за печат чрез слайсване – процес, при който дигиталният обект се разделя на тънки 2D слоеве и се преобразува в машинен G-код. Този код съдържа инструкции за принтера, включително слоеве, настройки и траектории на печат. При по-големи обекти моделът може да бъде разделен на части, които впоследствие да се сглобят.

2.3. 3D принтиране

Третата стъпка е самото производство чрез избиране на технологичен процес за 3D печат. Най-популярните технологии за 3D печат включват:

- **FDM (Fused Deposition Modeling)** – разтопяване на пластмасова нишка и наслагване върху платформа.
- **SLA (Stereolithography)** – втвърдяване на фотополимерна смола с UV лазер.
- **SLS (Selective Laser Sintering)** – синтероване на прахообразен материал с лазер.

Избраният технологичен процес и материал определят физическите и механичните характеристики на крайния продукт.

2.4. Последваща обработка

След като обектът е принтиран, често се налага допълнителна обработка, за да бъде напълно готов за употреба. Това включва механични, химични или термични методи като шлайфане, полиране, боядисване или лакиране. Ако обектът е отпечатан на части, този етап може да включва и сглобяване (B2N Ltd, 2025).

На фиг.1 е показан 3D принтер ELEGOO Mars 4 Ultra. Той е компактен и високопроизводителен 3D принтер, използващ технологията MSLA за печат с фото полимерни смоли.

Принтерът разполага с работна площ от 153,36x77,76x165 [mm], подходяща за създаване на малки до средно големи обекти. Благодарение на новата ACF защитна филмова технология, Mars 4 Ultra постига скорост на печат до 150 [mm/h], което значително ускорява производствения процес (Elegoo Technology Co. Ltd, 2025).



Фиг. 1. 3D принтер ELEGOO Mars 4 Ultra (Elegoo Technology Co. Ltd, 2025)



Фиг. 2. 3D принтер Zortrax M200 (Zortrax, 2025)

За производство на малки детайли от полимерни материали, са подходящи 3D принтери, използващи FDM технология. На фиг.2 е показан 3D принтер за полимери. Той използва технологията Layer Plastic Deposition (LPD), при която разтопен термо пластичен материал се нанася слой по слой върху нагрятата платформа, изграждайки 3D модела. Принтерът е съвместим с външни материали, което предоставя гъвкавост при избора на консумативи. Работи със специализиран софтуер Z-SUITE, който улеснява подготовката на моделите за печат и предлага различни функционалности за оптимизиране на процеса. Има висока точност и повторяемост (Zortrax, 2025).



Фиг. 3. 3D принтер MfgPro230 xS (3D-EDU GmbH, 2025)

На фиг.3 е показан 3D принтер MfgPro230 xS, който е индустриален 3D принтер, произведен от XYZprinting. Използва технологията за селективно лазерно синтероване (SLS). Подходящ е за производствени и инженерни проекти, изискващи сложна геометрия и висока точност. Обема на изграждане е 230x230x230 [mm]. Той позволява производство на средно големи компоненти. (3D-EDU GmbH, 2025).

3. Инжекционно шприцоване

Шприцоването, познато още като леене под налягане, е широко използван технологичен процес за масово производство на пластмасови изделия с различни размери и форми. Процесът се основава на инжектиране на разтопен полимерен материал в предварително изработена форма (матрица), в която след охлаждане материала се втвърдява и придобива желаната форма. Основните етапи на този процес включват затваряне на матрицата, нагряване и разтопяване на пластмасата, впръскване в матрицата, охлаждане и изваждане на готовия детайл фиг.4 (Ariete Group, 2025).



Фиг. 4. Етапи на процеса шприцоване

Едно от най-големите предимства на шприцването е високата производителност, което го прави подходящо за серийно производство. Технологичния процес позволява изработка на сложни изделия с висока точност и повторяемост, а автоматизацията на процеса намалява производствените разходи и времето за производство. Шприцването се използва в много индустрии, включително автомобилостроене, електроника, медицина, машиностроене и др.

В автомобилната индустрия, тази технология се прилага за производство на табла, брони и различни вътрешни и външни компоненти. Въпреки своите предимства, шприцването има и някои недостатъци. Един от основните е високата първоначална инвестиция за изработка на матриците, което го прави по-малко ефективен за малки производствени серии. Освен това, контролът на параметрите е изключително важен, за да се избегнат дефекти като свиване, деформации и вътрешни напрежения в детайлите (Cowon Mold Tech Co. Ltd, 2025; Deerp Mould Co. Ltd, 2025).

Един от основните фактори, влияещи върху качеството на детайла при инжекционното шприцоване е термичното свиване на материала. По време на охлаждането пластмасовите материали променят своите размери, което налага различни условия на шприцоване за различните видове пластмаси.

За да се гарантира високо качество на произведените детайли, при проектиране на формата (матрицата) трябва да се вземат предвид коефициентите на свиване, които зависят от използвания материал. Това позволява точно пресмятане на размерите, така че крайният продукт да отговаря на зададените изисквания.



Фиг. 5. Машина Arburg 370 C 600 – 250 (Exapro S.A.S, 2025)

Машината за леене под налягане Arburg 370 C 600-250 показана на фиг.5 е предназначена за производство на пластмасови детайли със средни размери. Точните размери на произвежданите детайли зависят от специфичния дизайн и геометрия на матрицата, използвана в производствения процес (Exapro S.A.S, 2025).



Фиг. 6. Машина ENGEL VICTORY 330 / 80 HL (Engel Machinery INC, 2025)

Машината за леене под налягане ENGEL VICTORY 330/80 HL показана на фиг.6 е предназначена за производство на малки до средни по размер пластмасови детайли. Със сила на затваряне от 80 [t] и диаметър на шнека от 35 [mm], тя е подходяща за изработване на компоненти с тегло до приблизително 185 [g].

Размерите на плочите за монтаж на матрицата са 670 [mm] по дължина и 600 [mm] по ширина, което позволява използването на матрици с височина от 170 [mm] до 370 [mm]. Тези характеристики, правят машината подходяща за производство на различни пластмасови детайли, включително прецизни компоненти и изделия с високи изисквания към качеството и точността. (Engel Machinery INC, 2025).

4. Сравнителен анализ на 3D принтиране и инжекционно шприцоване

3D принтирането и инжекционното шприцоване са два от най-разпространените технологични процеса за производство на пластмасови детайли. Въпреки че и двата процеса служат за създаване на изделия с различни форми и размери, те се различават съществено по отношение на процеса, приложенията, разходите и мащаба на производство.

Таблица I. Сравнителен анализ на основните характеристики

Характеристика	3D принтиране	Инжекционно шприцоване
Технология на производство	Аддитивен (изграждане слой по слой)	Субтрактивен (инжектиране на разтопен материал в матрица)
Гъвкавост	Подходящо за персонализирани и сложни детайли	Подходящо за масово производство на идентични детайли
Използвани материал	Полимери (PLA, ABS, PETG, смоли, найлон), метали, керамика, композити	Предимно термо пластични полимери (ABS, PP, PE, PC, PVC)
Прецизност	Висока, но зависи от технологията и материала	Много висока и постоянна при серийно производство
Необходима подготовка	Минимална – само 3D модел и слайсване	Сложна – необходима е матрица (форма)

Таблица I сравнява технологията на производство, използваните материали, прецизността и необходимата подготовка.

3D принтирането използва адитивна технология, при която материалът се добавя слой по слой, което позволява създаването на сложни геометрии без нужда от специална матрица. Инжекционното шприцоване, използва субтрактивна технология, при която разтопената пластмаса се впръсква в матрица, осигурявайки висока точност и постоянство при серийно производство.

В таблица II се анализират индустриите и производствата, в които двата технологични процеса се използват. 3D принтирането е подходящо за бързо прототипиране, персонализирани продукти и сложни геометрии.

Инжекционното шприцоване се използва главно за масово производство, където е необходимо голямо количество идентични детайли с ниска себестойност.

Таблица II. Сравнителен анализ на областите на приложение

Приложение	3D принтиране	Инжекционно шприцоване
Прототипиране	Идеално за единични бройки и тестови модели	По-рядко използвано за прототипи, заради разходите за матрица
Масово производство	Не е подходящо поради високи разходи за време и материали	Оптимално за големи серии (хиляди и милиони бройки)
Медицински изделия	Подходящо за персонализирани протези, зъбни импланти и биоразградими материали	Подходящо за серийни медицински изделия, като спринцовки и контейнери
Автомобилна индустрия	Използва се за прототипи, сложни дизайни и персонализирани части	Използва се за серийно производство на вътрешни панели, копчета и корпуси
Електроника	Подходящо за специализирани компоненти и малки серии	Подходящо за производство на пластмасови корпуси и електрически изолатори

Таблица III сравнява началните инвестиции, разходите за единичен детайл и производствената скорост.

3D принтирането изисква по-ниски начални инвестиции, но по-високи разходи на детайл при големи обеми.

Инжекционното шприцоване има висока първоначална инвестиция (разходи за матрица), но е икономически ефективно при масово производство.

Таблица III. Сравнителен анализ на разходите и производителността

Критерий	3D принтиране	Инжекционно шприцоване
Начални разходи	Ниски – цените на принтерите започват от няколкостотин долара	Високи – необходимо е закупуване на машина и изработване на матрица, която е скъпа
Производствени разходи	По-високи за големи серии, ниски за единични бройки	Ниски при големи обеми, високи за единични бройки
Скорост на производство	По-бавно, особено при сложни детайли	Изключително бързо при серийно производство
Цена на детайл	Висока при голям обем, но ниска за единични бройки	Много ниска при масово производство, висока за малки серии

Таблица IV представя предимствата и недостатъците на двата сравнявани технологични процеса.

Таблица IV. Сравнителен анализ на предимствата и недостатъците

Критерий	3D принтиране	Инжекционно шприцоване
Предимства	Гъвкавост, лесно персонализиране, минимални отпадъци, бързо прототипиране	Висока производителност, ниска цена при големи серии, отлична прецизност
Недостатъци	По-бавно, висока цена при масово производство, по-ниска якост на материалите	Скъпи инструменти (матрици), неефективно за малки серии, ограничена сложност на детайлите

3D принтирането предлага голяма гъвкавост и минимални отпадъци, но е по-бавно и неефективно за мащабно производство.

Инжекционното шприцоване осигурява висока производителност и ниска цена на детайл, но изисква голяма първоначална инвестиция и няма гъвкавост при промени в дизайна.

5. Изводи

3D принтирането е най-добрият избор за бързо прототипиране, за малки серии и персонализирани изделия, докато инжекционното шприцоване е подходящо за масово производство с висока точност и ниска себестойност.

В зависимост от конкретните нужди на производството, двата метода могат да бъдат комбинирани – 3D печатът може да се използва за създаване на прототипи и тестови модели, преди да се пристъпи към серийно производство чрез инжекционно шприцоване.

REFERENCES

- Ariete Group, (2025). Injection molding of plastic under pressure. Custom production of plastic solutions, automotive plastic components through high-tech pressure injection molding. [viewed 12 March 2025]. (in Bulgarian). Available from: <https://www.ariete-group.eu/bg/>
- B2N Ltd, (2025). What is 3D printing and the types of 3D technologies, [viewed 15 March 2025] (in Bulgarian). Available from: <https://b2n.bg/blog/kakvo-e-3d-printirane-i-vidovete-3d-tehnologii>
- Cowon Mold Tech Co. Ltd, (2025). What is plastic injection molding [viewed 14 March 2025]. Available from: <https://bg.cw-mold.com/injection-molding/>
- Deep Mould Co. Ltd, (2025). What is plastic injection molding under pressure [viewed 14 March 2025]. (in Bulgarian). Available from: <https://bg.deepmould-fr.com/plastic-injection-molding/>
- Dimitrova, R. (2024). Assessment of the possibilities for modernization of an automated mechatronic system for closing containers with screw caps, *Journal Automation of Discrete Production*, Issue 6 July 2024, ISSN: 2682-9584, pp. 31-36.
- Dimitrova, R., Zhmud, V., Petrov, N., Vakarelska T. (2019). Study accuracy of a transportation system positioning of a test rig for automated mounting of luster terminals, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 659, Issue 1, ISSN 17578981, DOI: 10.1088/1757-899X/659/1/012031
- Groover, M., (2013). Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems. Fifth Edition. *John Wiley & Sons, Inc.* ISBN 978-1-118-231463
- Elegoo Technology Co. Ltd, (2025). Photopolymer 3D Printer ELEGOO MARS 4 ULTRA 9K technology [viewed 17 March 2025]. (in Russian). Available from: <https://elegoo.ru/mars-4-ultra-9k>
- Engel Machinery INC, (2025). The Universal Tie-bar-less Machine. Victory Injection Molding Machine [viewed 13 March 2025]. Available from: <https://www.engelglobal.com/en/ca/products/injection-molding-machines/tie-bar-less-injection-molding-machine>

- Exapro S.A.S. (2025). Injection molding machine Arburg 370 C 600 – 250 [viewed 12 March 2025]. Available from: <https://www.exapro.bg/arburg-370-c-600-250-p231012183/>
- Zortrax, (2025). Zortrax M200 [viewed 17 March 2025]. Available from: <https://zortrax.com/3d-printers/m200-/>
- 3DBGPRINT Ltd, (2025). What is 3D printing as a technology [viewed 12 March 2025]. (in Bulgarian). Available from: <https://3dbgprint.com>
- 3D-EDU GmbH, (2025). XYZprinting MfgPro 230 xS. Industrial SLS 3D Printer [viewed 12 March 2025]. (in German). Available from: <https://3d-edu.ch/sls-3d-drucker/mfgpro-230-xs/>

COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR THE PRODUCTION OF SMALL NON-METALLIC PARTS

Abstract. This article examines the various technological processes for the production of small-sized non-metallic parts. A comparative analysis of the two most commonly used technological processes, 3D printing and injection molding, is made. The analysis focuses on the efficiency, accuracy, costs and applicability of the processes. Existing machines for the considered technological processes from various leading manufacturers are presented.

Keywords: technological process, small-sized part, production, 3D printing, injection molding

Assist. Prof. Anna-Maria Lazarova, Eng

ORCID iD: 0009-0009-3104-2901

Web of Science Researcher ID: MTG-3577-2025

Technical University of Sofia

Sofia, Bulgaria

E-mail: lazarova990@gmail.com

Prof. Stiliyan Nikolov, PhD

ORCID iD: 0000-0002-2485-3847

Web of Science Researcher ID: ACY-7901-2022

Technical University of Sofia

Sofia, Bulgaria

E-mail: st_nikolov2@tu-sofia.bg



INVESTIGATING THE ROUGHNESS OF 3D PRINTED POLYMER SAMPLES

Miglena Paneva*Bulgarian Academy of Sciences,
Institute of Information and Communication Technologies, Bulgaria***Peter Panev***Bulgarian Academy of Sciences,
Institute of Information and Communication Technologies, Bulgaria***Gabriela Kotseva***Bulgarian Academy of Sciences,
Institute of Information and Communication Technologies, Bulgaria*

Abstract. This work examines the types of 3D printing, and the roughness achieved as a result of each of the printing technologies. More detailed attention is paid to FDM printing. Test specimens were made from different types of filaments, on which the roughness parameters were measured at a layer height of 0.1 mm. Test specimens were also made from PLA with different layer heights, and the values for two types of 3D printers were compared. The results obtained were analyzed.

Key words: surface roughness, 3D printing, height layer, FDM technology

1. Introduction

3D printing is increasingly used in the industry for prototyping, household products and many other areas, thanks to the rapid production from a digital file to a finished product. After conducting a study in (Heather, 2013) found that through 3D printers, consumers can produce products needed in their daily lives themselves, instead of purchasing them. With the development of technology, the types of 3D printing methods are also increasing. They differ in the way of printing and the type of materials.

1.1. Fused Deposition Modelling technology

The most common and easily accessible is the Fused Deposition Modeling (FDM) technology, in which a polymer filament is melted to a certain temperature and extruded through a nozzle, building it up layer by layer until the finished part is obtained. For models that are not flat or have a complex shape, a supporting material is required for its proper construction.

1.2. Selective laser sintering technology

Selective laser sintering (SLS) is another type of technology in which a powder material is polymerized by a laser. When building models with this technology, the use of a support material is not necessary. Large pores and holes can be formed depending on the size of the powder. It is extremely suitable for the simultaneous production of numerous identical parts that are located at a close distance from each other.

1.3. Stereolithography

Stereolithography (SLA) technology works with liquid photopolymers that are hardened using a UV laser beam. The model is built layer by layer according to the given design until it is completed. With this technology, there is no need to support the material, and the model is built from top to bottom, upside down. The finished parts are characterized by non-porous and smooth surfaces with high resolution.

1.4. Metal 3D printing

Metal 3D printing can be done in 3 ways, as the types of materials can be different metal materials and alloys - stainless and instrument steels, Inconel, titanium alloys, aluminum alloys, copper, chromium-cobalt, nickel alloys. The possible materials are in the form of powder and filament.

- SLM (selective laser melting) printing is done by laser melting and soldering of metal powder;
- EBM (electron beam melting) printing is done by melting metal powder using an electron beam;
- DED (direct energy deposition) printing can work with both metal powder and filament, simultaneously extruding and soldering the material until the part is completed layer by layer.

1.5. PolyJet technology

Polyjet technology is one of the latest technologies, in which the material used is in the form of a liquid photopolymer. Drops of the material are sprayed through inkjet heads and hardened by a UV lamp, as the manufactured part can be made of different materials at the same time. In Polyjet printing, a supporting material is used, which is water-soluble or removed with water under high pressure. The final product has high print quality and smoothness.

1.6. Multi Jet Fusion technology

Multi Jet Fusion (MJF) technology produces detailed and precise parts without support material. Using an inkjet matrix, melting agents are selectively applied to polyamide (PA), polypropylene or TPU powder, which is then melted by heating elements and cured by UV light. After each layer, the powder is distributed on the bed and the process is repeated until the part is completed. After the printing process is completed, the residual powder is removed by various shot peening systems.

Each of the technologies achieves a different smoothness of the printed material (Bakardzhiev, 2024). Most technologies require mechanical post-processing of the printed parts, such as sanding, sandblasting, blasting and polishing, to achieve a better appearance or when removing the support material, which leaves rough areas. However, despite the applied smoothing methods, the surface cannot become smooth as glass.

According to sources (Pérez, 2018; Reddy, 2018; Peng, 2018; Kovan, 2018; You, 2016; Altan, 2018; Mohamed, 2017; Czyżewski, 2022; Brenes, 2020) the greatest influence on roughness is exerted by the set printing parameters such as layer height and the slope of the printed part.

When 3D printing with a lower layer height, the resulting part has better external characteristics and is smoother at the expense of slower production (Haque, 2019; Reddy, 2018). In FDM printing technology, the layer height is determined by the size of the printing nozzle. The smaller the thickness is set, the higher the nozzle clock frequency will be, which will lead to a drop in pressure and poor quality (Chohan, 2017).

In this work, the roughness of each technology will be analyzed and more attention will be paid to the FDM technology, which is the most widespread. The goal is to study and analyze the roughness values of different materials obtained by FDM printing. Another task is to make roughness measurements at different layer heights when printing with Polylactic Acid (PLA) filament by comparing the values of test specimens made by two types of FDM printers.

2. Roughness of parts printed using different technologies

In the production of 3D printed parts, the surface quality varies significantly depending on the printing technology and orientation, the type of material, and the quality of the printer (Golhin, 2023; Buj-Corral, 2019). 3D printing parameters such as temperature and speed also affect the roughness values (Bakardzhiev, 2024). Roughness is usually measured with a roughness tester and is measured in Ra and Rz values. The unit of measurement for determining the deviation from the ideal plane of the surface is usually microinches or micrometers (μm). The most commonly used unit is μm . The lower the Ra value, the smoother the surface.

Each of the printing technologies has different layer height limits. Table I presents tolerances of the values of layer height at different additive technologies.

Table I. Tolerance of layer height at different additive technologies

Technologie	Layer Height, mm
FDM	0,06÷0,4
SLS	0,08÷0,12
SLA	0,025÷0,1
PolyJet	0,014÷0,027
MJF	0,08
Steel	0,05
Aluminum	0,03÷0,1

As can be seen from Table I, the PolyJet technology has the smallest layer height and should provide the best surface quality and the lowest roughness.

Table II presents roughness values in Ra, μm and Rz, μm after 3D printing of test bodies manufactured using different technologies from polymer materials and metal powder.

Table II. Roughness of parts using different technologies after 3D printing

Technologie	Material	Ra, μm	Rz, μm
SLS	PA 12 filled with aluminium	8	50,1
MJF	PA 12	10-12	59,9 – 69,4
DMLS	Stainless Steel 316L, Bead blasted	6	39,8
SLA	ABS-like	1,5	10,1
FDM, perpendicular to the layering	ASA	22,5	114,9
FDM, parallel to the layering	ASA	0,9	
PolyJet	Photopolymer rigid	2,1	17,2

From the data provided, the best performance was measured with SLA and PolyJet technologies with Ra- 1.5 μm and 2.1 μm , respectively.

3. Experimental results and discussion

A study was made of the roughness of test bodies made of Polylactic Acid (PLA) filament, which were printed at different layer heights using FDM technology. Two 3D printers- the Tevo Tornado and the Ultimaker C5, were used to compare the data. For the Tevo Tornado printer, the possible layer height options are 0.06 mm, 0.1 mm, 0.15 mm, 0.2 mm, 0.3 mm, 0.4 mm and 0.6 mm., and for the Ultimaker C5 printer they are 0.06 mm, 0.1 mm, 0.15 mm, 0.2 mm and 0.3 mm.

Table III records the time required to 3D print the same test body depending on the printer and layer height. The programs for setting the 3D printing parameters are implemented with the Cura program. Technically, despite the ability of the Tevo Tornado 3D printer to print parts with a set layer height of 0.06 mm, the test body could not be built due to the inability of the printer to feed filament at the set speed.

Measurements were made on each test body: along the Z axis (perpendicular to the layer) - (position 1), along the X axis (parallel to the layer) - (position 2) and on the top layer in both directions - Y- (position 3) and X- (position 4), shown in Fig.1. A portable roughness meter AR-132 CT was used and the parameters of R_a , μm and R_z , μm were recorded, Fig.2. Three measurements were made, the average values are described in Table IV.

Table III. Time for 3D printing, according to the layer height and 3D printer

Layer height, mm	Printing time of 3D Printer	
	<i>Tevo Tornado</i>	<i>Ultimaker S5</i>
0.06	133 min	75 min
0.1	64 min	59 min
0.15	41 min	34 min
0.2	32 min	18 min
0.3	22 min	
0.4	16 min	
0.6	11 min	

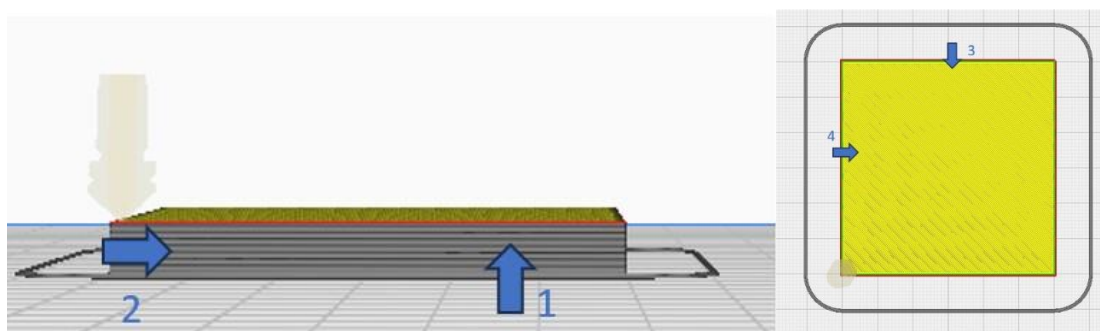


Fig. 1. Surface roughness measurement position

An analysis of the roughness of 3D printed test bodies from various 3D materials was also performed: PLA, PLA Wood, PETG, FilaFlex Sebs, ASA, PC, PA6, CPE HG100 with a layer height of 0.1 mm, Fig.3. The reported results are presented in Table V.



Fig. 2. Roughness Tester test pieces


Fig.3. Test pieces from different materials
Table IV. Measured and averaged surface roughness of 3D printed PLA test pieces

Layer height	Used 3D Printer	1. Perpendicular of the layer		2. Parallel of the layer		3. Top-perpendicular		4. Top-parallel	
		<i>Ra, μm</i>	<i>Rz, μm</i>	<i>Ra, μm</i>	<i>Rz, μm</i>	<i>Ra, μm</i>	<i>Rz, μm</i>	<i>Ra, μm</i>	<i>Rz, μm</i>
0,06	Ultimaker S5	5,3	15,0	0,3	0,8	1,3	3,5	1,0	2,7
0,1	Tevo Tornado	10,5	29,7	0,6	1,6	2,0	5,7	2,3	6,4
	Ultimaker S5	8,2	23,1	0,5	1,4	1,0	2,8	1,3	3,7
0,15	Tevo Tornado	13,5	38,1	0,9	2,4	7,2	20,4	7,2	20,5
	Ultimaker S5	13,1	37,2	0,5	1,4	1,2	3,4	0,8	2,2
0,2	Tevo Tornado	16,0	45,1	0,5	1,6	7,6	21,6	8,5	24,0
	Ultimaker S5	17,3	49,0	0,5	1,4	2,4	6,9	2,3	6,6
0,3	Tevo Tornado	21,97	62,14	2,10	3,19	7,65	21,64	9,31	26,32
	Ultimaker S5	23,96	67,75	0,44	1,24	1,53	4,32	2,27	6,42
0,4	Tevo Tornado	21,09	59,66	1,00	2,84	6,91	19,53	5,05	14,27
0,6	Tevo Tornado	22,20	62,75	1,26	3,57	7,52	21,28	5,73	16,20

Surface roughness measurements in 3D printing show increasing values when setting higher layer heights. When measuring in position 1, a large difference is observed in the roughness of the test bodies made by the two 3D printers. At almost all layer heights, the Ultimaker S5 achieves better smoothness than the Tevo Tornado. At a layer height of 0.1 mm, the largest difference of 22% in favor of the Ultimaker S5 is observed. Only at a layer height of 0.2 mm does the Tevo Tornado have good roughness indicators.

At 0.15 mm, there is no difference in roughness between the two printers. At the second measurement position 2, the roughness values are low because the tip of the roughness tester moves between the layers.

The roughness measurements in the surface layer of the part in position 3 and position 4 show similar results, as it increases with increasing layer height. The values at 0.06 mm start from Ra- 1.0 μm to Ra- 7.65 μm for 0.6 mm layer height.

Table V. Measured and averaged surface roughness of 3D printed test pieces

Material	Used 3D Printer	3. Top-perpendicular		4. Top-parallel	
Type	Type	Ra, μm	Rz, μm	Ra, μm	Rz, μm
PLA	Tevo Tornado	2,01	5,67	2,27	6,42
PLA Wood	Tevo Tornado	1,94	5,48	2,14	6,06
PETG	Tevo Tornado	2,37	6,71	1,65	4,68
ASA	Tevo Tornado	3,27	9,24	2,83	8,00
FilaFlex SEBS	Ultimaker S5	5,33	15,08	4,39	12,43
PC	Ultimaker S5	3,57	10,09	3,26	9,22
CPE HG100	Ultimaker S5	3,34	9,44	4,18	11,82
PA6	Ultimaker S5	4,89	13,81	4,38	12,38

At these measurement positions again, the test bodies produced by the Ultimaker 3D printer have significantly less roughness than those printed with the Tevo Tornado by 83%. Measurements of surface roughness in the top layer of test bodies made of different materials show that PLA, PLA Wood and PETG filaments have the lowest values of those studied.

4. Conclusion

3D technologies are one of the contemporary ways to manufacture parts and functional parts. For those requiring higher precision and smoothness, the use of Stereolithography and Polyjet technologies is recommended. The most widely available 3D printing technology is Fused Deposition Modelling technology. To achieve the best quality and speed of printing, it is recommended that the layer height parameters be 0.1 mm or 1.15 mm. The surface roughness with these parameters is like SLS and MJF technologies, but the price of FDM parts will be much cheaper due to the lower cost of consumables and printers. The comparison of roughness data for different types of filaments for FDM printing with a layer height of 0.1 mm did not show significant differences. However, lower roughness values are observed for materials that are easier to print compared to those that require greater attention to 3D printing settings.

Acknowledgment

The research was carried out as part of project No KP-06-M77/1 "Investigation and comparison of the characteristics of 3D printed test bodies with metal ones under normal conditions and conditions of elevated temperature" and project No KP-06-M87/4 "Research the wear resistance of machine elements, possibilities for optimizing their properties through innovative methods and materials" both financed by the Bulgarian National Science Fund.

REFERENCES

- Altan, M., Eryildiz, M., Gumus, B., Kahraman, Y. (2018). Effects of process parameters on the quality of PLA products fabricated by fused deposition modeling (FDM): Surface roughness and tensile strength. *Mater. Test.*, 60, pp. 471–477. DOI: 10.3139/120.111178
- Bakardzhiev, V., Sabev, S., Kasabov, P. (2024). Research on the impact of extrusion temperature, printing speed and layer thickness in 3D printing using material deposition technology. *AIP Conf. Proc.*; 2980 (1): 060004. Available from: <https://doi.org/10.1063/5.0190033>.
- Brenes, C., Renne, W., Tolbert, T., Fantaski, L. (2020). Effect of Print Angulation on Surface Roughness of 3D-Printed Models. *Compend Contin Educ Dent. Volume 41, Issue 10*: e1-e4. PMID: 33350846
- Buj-Corral, I., Domínguez-Fernández, A., Durán-Llucià, R. (2019). Influence of Print Orientation on Surface Roughness in Fused Deposition Modeling (FDM) Processes. *Materials*. 12(23):3834. <https://doi.org/10.3390/ma12233834>
- Chohan, J. S., Singh, R. (2017). Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications. *Rapid Prototyping Journal*. 23, pp. 495–513. <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2015-0059>
- Czyżewski, P., Marciniak, D., Nowinka, B., et al. (2022). Influence of extruder's nozzle diameter on the improvement of functional properties of 3D-printed PLA products. *Polymers* 14, no. 2: 356. <https://doi.org/10.3390/polym14020356>.
- Golhin, A. P., Tonello, R., Frisvad, J. R., et al. (2023). Surface roughness of as-printed polymers: a comprehensive review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 127, pp. 987–1043. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11566-z>
- Haque, M. E., Banerjee, D., Mishra, S. B., et al. (2019). A numerical approach to measure the surface roughness of FDM build part. *Materials Today: Proceedings, Volume 18, Part 7*, pp. 5523-5529, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.659>
- Heather, K., (2013). Study: At-home 3D printing could save consumers “thousands”. *CNN*. Accessed on [2015-04-29] <https://edition.cnn.com/2013/07/31/tech/study-at-home-3-d-printing-could-save-consumers-thousands/index.html>
- Kovan, V., Tezel, T., Topal, E. S., Camurlu, H. E. (2018). Printing Parameters Effect on Surface Characteristics of 3D Printed Pla Materials. *Mach. Technol. Mater.*, Volume 12, Issue 7, pp. 266–269. [viewed 28 March 2025]. Available from: <https://stumejournals.com/journals/mtm/2018/7/266>
- Mohamed, O. A.; Masood, S. H.; Bhowmik, J. L. (2017). Characterization and dynamic mechanical analysis of PC-ABS material processed by fused deposition modelling: An investigation through I-optimal response surface methodology. *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, Volume 107, pp. 128–141. ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.019>
- Peng, T., Yan, F. (2018). Dual-objective Analysis for Desktop FDM Printers: Energy Consumption and Surface Roughness. *In Proceedings of the Procedia CIRP, Gulf of Naples, Italy, Volume 69*, pp. 106–111. ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.084>.
- Pérez, M., Medina-Sánchez, G., García-Collado, A., Gupta, M., Carou, D. (2018). Surface quality enhancement of fused deposition modeling (FDM) printed



samples based on the selection of critical printing parameters. *Materials*, 11(8), 1382. <https://doi.org/10.3390/ma11081382>

Reddy, V., Flys, O., Chaparala, A., Berrimi, C. E., Rosen, B. (2018). Study on surface texture of Fused Deposition Modeling. *Procedia Manuf.*, 25, pp.389–396. ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.108>

You, D. H. (2016). Optimal printing conditions of PLA printing material for 3D printer. *Trans. Korean Inst. Electr. Eng.*, 65, pp. 825–830. DOI: 10.5370/KIEE.2016.65.5.825

Ch. Assist. Miglena Paneva, PhD

ORCID iD: 0009-0007-1559-1172

Web of Science Researcher ID: MSV-7571-2025

Bulgarian Academy of Sciences,
Institute of Information and Communication Technologies, Bulgaria
Sofia, Bulgaria

E-mail: m.paneva7@gmail.com

Ch. Assist. Peter Panev, PhD

ORCID iD: 0009-0001-8950-8753

Web of Science Researcher ID: MTE-1636-2025

Bulgarian Academy of Sciences,
Institute of Information and Communication Technologies, Bulgaria
Sofia, Bulgaria

E-mail: panev@gmail.com

Assist. Gabriela Kotseva, Eng

ORCID iD: 0009-0000-7099-0052

Web of Science Researcher ID: HLS-6821-2023

Bulgarian Academy of Sciences,
Institute of Information and Communication Technologies, Bulgaria
Sofia, Bulgaria

E-mail: gabriela.kotseva@iict.bas.bg

COLLABORATIVE OFF-ROAD ROBOT WITH HYDROGEN FUEL CELL FOR HEALTHCARE

Roman Zahariev

Bulgarian Academy of Sciences, Institute of Robotics, Bulgaria

Nina Valchkova

Bulgarian Academy of Sciences, Institute of Robotics, Bulgaria

Abstract. The article discusses the concept of creating a collaborative service robot powered by a hydrogen fuel cell, designed to support medical facilities. The characteristics of this robot are analyzed and its advantages in terms of environmental performance and long life during the activities of serving patients in serious health conditions and their transportation to a hospital are highlighted. Some main characteristics and advantages of this type of robot powered by hydrogen fuel cells are compared with battery-powered robots and the positive aspects of this comparison are shown. The advantages of modern collaborative robots used as service robots in the processes of transport service to the hospital are presented. The possibilities of creating and implementing such a robot for the needs of serving people in medical facilities, which would be powered by a hydrogen fuel cell, are shown. The main characteristics of the created mobile collaborative service robots are briefly indicated. The article analyzes the process of creating these collaborative robots. The main structural elements of the structure are implemented, such as the power supply system based on a hydrogen fuel cell, the mechanical system with high cross-country ability, the robot control system with its sensor system, as well as the navigation system and its development with elements of artificial intelligence.

Keywords: service mobile robots, hydrogen robots

1. Introduction

The energy that hydrogen provides is an alternative to fossil fuels with the potential to achieve society's development goals. Hydrogen is found in many chemical compounds, such as water and organic biomass, and its combustion produces heat energy – without pollutants or carbon dioxide. Increased energy consumption is a universal driver for improving the quality of life in all societies, from developing to developed countries. The challenge is to find highly efficient ways to produce, deliver and use energy that will improve the quality of life without endangering the environment, climate or geopolitical relations (Valchkova, 2019). Hydrogen fuel cell technology is the subject of continuous research and development. Hydrogen fuel cells are being investigated as a clean and efficient alternative to traditional internal combustion engines, especially in the transport sector. Hydrogen combines with oxygen in the electrochemical reactions of fuel cells to produce electricity. The most efficient use of hydrogen is to convert its chemical energy into electrical energy in so-called "Fuel Cells". The high conversion efficiency of fuel cells, up to 60%, makes them attractive compared to other fossil fuel-based electrical alternatives, which are on average about 34% efficient. The high efficiency of fuel cell engines (typically over 90%) makes them attractive for transportation. Structurally, fuel cells consist of two electrodes (Fig. 1) separated by an electrolyte. In the case of a hydrogen fuel cell, hydrogen goes to the anode, acting as fuel, and oxygen, or most often air, goes to the cathode.

The idea of the fuel cell is that through the presence of a catalyst, molecular hydrogen is initially dissociated on the surface of the electrode as two hydrogen atoms. By giving up an electron, the hydrogen atoms are oxidized to hydrogen cations.

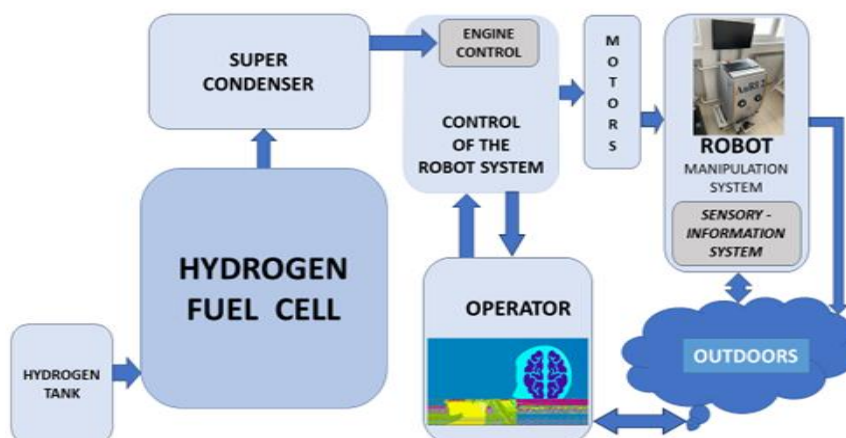


Fig. 1. View of the robot Roby 1

To reach the cathode, the resulting electrons and protons take different paths. The protons pass through a membrane, while the electrons are captured by the external circuit of the cell and represent ready-to-use energy. On the cathode side, in the presence of a catalyst, the protons, together with some of the electrons and oxygen, form the waste product (water vapor or pure water) of the fuel cell operation.

The reactions that occur in a fuel cell are as follows:

- at the anode: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ (1)
- at the cathode: $2e^- + 2H^+ + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$ (2)
- total for the cell: $H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$ (3)

The first fuel cell was developed in 1839 by the English scientist William Grove. After 60 years, Mond and Langer managed to improve the design of the fuel cell. Their Fuel Cell uses hydrogen and oxygen, delivering a current density of 3.5 [mA/cm²] and a voltage of 0.72 [V]. Although the fuel cell was developed so long ago, it found more serious application in the early 1960 s in manned flights of the US space program as a source of electricity and water.

Here are some key features and advantages of hydrogen fuel cell-powered robots compared to a classic battery-powered robot:

- **Clean energy:** Hydrogen fuel cells produce electricity with water vapor as the only byproduct, making them an environmentally friendly source of energy. This is especially important for applications where reducing carbon emissions is particularly important.
- **Longer operating time:** Hydrogen fuel cells can provide longer operating times than traditional batteries. This is especially useful for robots that need long periods of operation between recharges.
- **Fast Refueling:** Refueling a hydrogen fuel cell is typically faster than recharging a battery, providing a faster turnaround time for the robot to resume working on its tasks. This is a particular advantage in applications that require continuous or near-continuous operation.

2. Description of the robotic platform

2.1. Off-road Mechanical System of Robot Roby 1

The designed Collaborative Mobile Robot is highly cross-country and capable of working off-road (Fig. 2) and is intended for healthcare assistance (Valchkova, 2023). With its help, it is possible to transport a victim in a very rugged area to the place, where specialized ambulance-type vehicles can be used or to the hospital itself. In the case of suspicious abandoned luggage or other objects that may contain an explosive substance, by using the robot's manipulator which is used to load the suspicious object so that it can be transported to a sufficiently safe distance, where specialized personnel from a team of sappers can take care of their disposal.

Also, with the help of a special thermal camera, it is possible to extinguish fires, including in buildings, as the robot is directed to the brightest area of the fire and floods it with special fire-extinguishing foam. For this purpose, the robot is equipped with a special tool called a "jet", through which a special foam is thrown under pressure onto the fire, thus limiting contact with oxygen from the air and suffocating the fire (Fig. 3).

Based on the specific running mechanism, consisting of 4 triangular-shaped chains, high cross-country ability is achieved with the ability to overcome obstacles, as well as climb stairs (Valchkova, 2023). The chains are equipped with three gears located at the corners of an equilateral triangle, around which there is a plastic chain with metal elements. In the middle of the chains there is an axis of free movement, providing the ability to overturn the structure when an obstacle is encountered. In the event of one or two of the slats encountering an obstacle or a step on a ladder, the contact point appears as a momentary center of rotation and the entire chain structure rolls around the obstacle (Fig. 2), thus overcoming it and maintaining the robot's forward movement. Each of the four chains is equipped with an electric motor, so this obstacle avoidance mechanism works for each of them independently, thus supporting the movement of the robot (Zahariev, 2019).

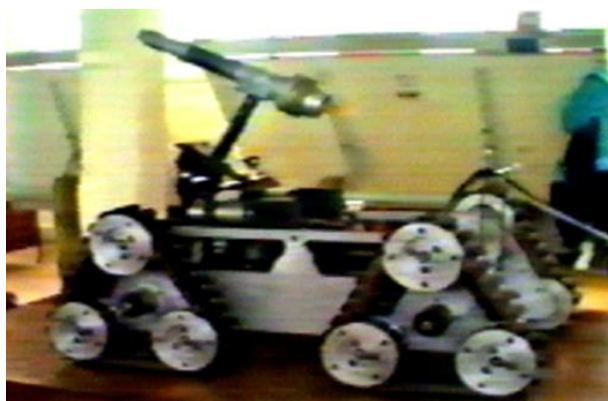


Fig. 2. View of the robot Roby 1

The four chains are mounted on a housing on which it is possible to place a stretcher for transporting a victim and which houses the control electronics cassette, as well as numerous types of sensors providing the necessary information about the environment. The entire structure is powered by a rechargeable battery located in the housing and can be charged from an external docking station. The four tracks are mounted on a housing on which it is possible to place a stretcher for transporting a casualty and which houses the control electronics cassette as well as a number of types of sensors providing the necessary information about the environment.

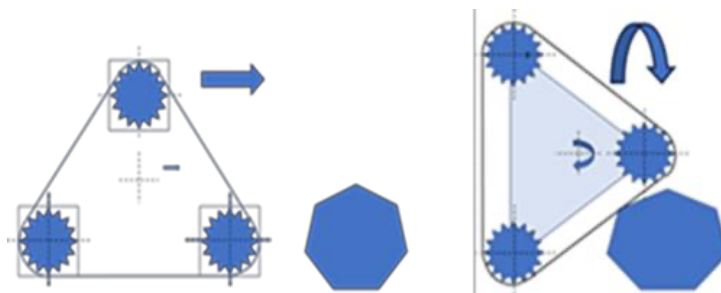


Fig. 3. Overcoming an obstacle by a track

The whole structure is powered by a rechargeable battery located in the housing and can be charged from an external docking station. A manipulator with 7 degrees of mobility and a three-finger gripper are mounted on the robot body. In the case of fire extinguishing equipment, a stand with a special "Sprayer" connected to a foam fire extinguisher is mounted on a platform of the body, so that it is possible to spray this foam on the brightest part of the fire. Also, the overall dimensions of the robot are consistent with the dimensions of building standards, so that it is possible for the robot to pass through doors and reach internal rooms of the burning building.

2.2. Robot Control System of Robot Roby 1

The robot drive control is implemented on the basis of "servo" controllers with feedback from incremental sensors located at each level of mobility of the manipulator. The regional levels of the manipulator are equipped with electromagnetic brakes. The four triangular chains of the platform are equipped with worm gearboxes that do not allow backward movement, using their braking effect.

The robot control system is of a hierarchical and distributed type. Communication between all modules is carried out via the RS 232 serial interface. The robot control processor module is a 32-bit microprocessor block with the architecture of the Cortex-M processor family. The processor module integrates a digital signal processing unit (DSP) with support for floating-point processing for a fast and energy-efficient algorithm. Cortex-M4 is used in digital control applications such as motor control, sensor information fusion, power control and is suitable for implementing the proposed algorithm for analytical coordinate transformation (Fig. 4).

The original universal I/O board for service robots is used. A set of digital and analog inputs, a 10/100 Ethernet interface, PWM control using CAN, SPI and I2C buses are implemented. This configuration allows for a flexible solution for connecting various sensors and implementing robotic drives. The use of Mixed Reality Server Node in the control system implements a combination of information from the map server, the navigation component and the robot's knowledge base about objects in the environment (Angelov, 2011). The process of recognizing and identifying scenes from the surrounding work area is carried out using elements of artificial intelligence. The result obtained is compared with the information from the database and an intelligent decision is made to continue the execution of the preset program. Provided that a positive result is obtained, a self-learning process is activated, in which the obtained results are recorded in a database for use in future actions. The control information is sent as an augmented reality stream to the supervisor's graphical user interface (GUI) (Borenstein, 1996).

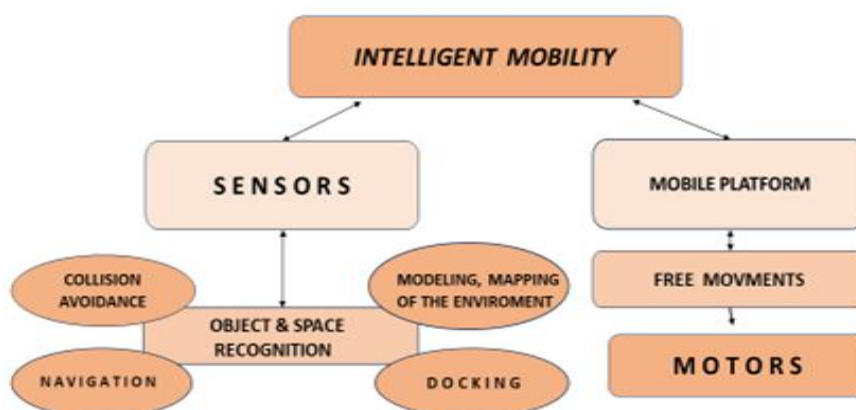


Fig. 4. Graphical representation of the components supporting Intelligent Mobility

There, some of the data processing is performed before being sent back to the robot from the user interface. The ROS Bridge tool in the ROS package is used as part of the communication solution. Through ROS Bridge, it is possible to access ROS via JSON formatted messages with a single socket, as well as via the so-called WEB socket. It uses TCP port (9090) for communication, which is very convenient for remote access, since the message can be easily forwarded through network protections (Horváth, 2021). Thus, WEB sockets provide a way to communicate with low latency, which is very important in such an application where real-time response is crucial (Fig.5). The current version of ROS Bridge supports the creation of ROS topics, publishing messages, invoking ROS services, authentication and security functions, and a ROS launcher (Paunski, 2017).

3. Sensors system for service robot ROBY 1

The robot's sensor information system converts various values (most often physical) into an information signal (most often electrical), which gives an idea of the quantity and quality of the measured quantity. The mobile service robot is subject to specific requirements for the sensor information system, dictated in particular by the following characteristics of the robot:

- Heterogeneity of the system: it must combine elements that function in different ways, communicate using different protocols and fulfill different goals.
- Heteroarchaism, heterogeneity of the system organization: some of the elements are centralized and hierarchically organized, while others are distributed with a high degree of autonomy:
- Work in conditions of uncertainty: since the dynamics of change leads to reaching the limits of knowledge, it is often necessary for the system to use probabilistic or fuzzy methods.
- Work in real-time mode: all changes in the structure and functions of the system must be built in real-time mode.

The robot is equipped with infrared and ultrasonic sensors that determine the distance to possible obstacles. Around the platform there are elastically mounted microswitches that are activated when the robot touches other objects and block its operation when necessary. The overall complex of devices also includes a "Stereovision" video camera, capable of monitoring and responding to the dynamically changing stochastic environment (Probst, 1996).

The robot is also equipped with a sensor, a laser interferometer scanner (Lidar), through which it is possible to monitor changes in the environment. With its help, details about the obstacles encountered are obtained and on this basis a decision is made by the robot to plan a safe trajectory of movement with the ability to avoid collisions. On the screen of the control computer, it is possible to observe the information from the lidar, which shows the coordinates of the points in the environment that represent obstacles. Through the procedure for integrating the specialized software module, the data is read and loaded into another such module, the processing leading to the recognition of the resulting "pseudo" image of the environment and this information is updated interactively every 60 milliseconds.

4. Planning trajectory of the robot using the fusion of the sensors information

The integration of robotic mechanical systems and a wireless sensor network (WSN) is a development in modern technologies, which allows the creation of intelligent, adaptive and autonomous systems. This synergy combines the physical capabilities of the robot with the controlled actions from the received data and with the use of the communication power of a wireless sensor network WSN, enabling advanced applications (Khatib, 1997).

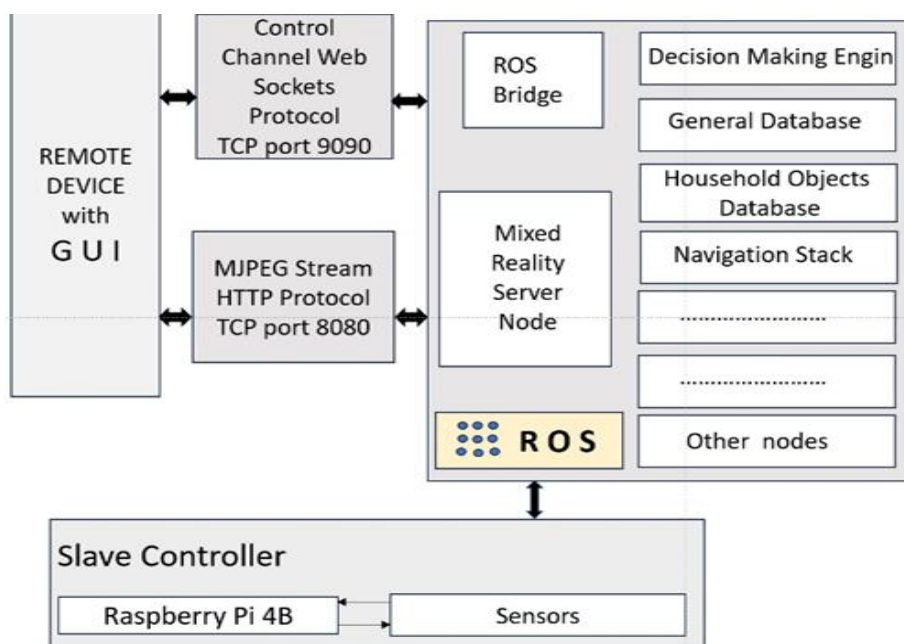


Fig. 5. Software architecture with a communication structure

The coherence between sensors and mechanical units for which they must provide information is not unambiguous. For example, one sensor is connected to a mechanical connection (robot encoder), in other cases several sensors measure the same quantity (Lidar, optical sensor, infrared sensor), in the third case the same sensor provides information for several mechanical components (video sensor and multi-point tracking in space), etc. It is important to note the dynamics of the configuration, which requires a rapid change in the overall functioning of the sensor system under the influence of the coordination unit of the mobile robot (Serpanos, 2018).



This ambiguity and dynamics of the sensor flow implies the need to integrate information, unify, sort, filter and supplement the data necessary to achieve the current goal. The dynamics of the changing environment requires the integration of information from new sensors, connected in a new way with new mechanical units, new algorithms and approaches (Siegwart, 2019).

In practice, there is a large arsenal of approaches and methods for integrating information in the Mobile Service Robot. The question of strategy and tactics of the specific implementation is what combination of such methods will be applied. The sensor subsystem combines signals from all sensors and, after processing, outputs information about the situation in which the robot is located at all times.

5. Conclusion

The expected result is the creation and implementation of a Service Mobile Collaborative Robot for the needs of medicine, which will be powered by a hydrogen fuel cell. The use of a hydrogen fuel cell as a power source in a robot designed to work in an environment with obstacles is an innovative process. Using the advantages of such a drive, it is possible to significantly extend the operating period of the robot, while at the same time there will be no release of pollutants, since only water and heat are released in this process. They can be used secondarily in the work processes of the hospital facility as elements of the environment.

In addition, in the process of creating this Collaborative Robot, several important, from a scientific point of view, elements of the Control System are implemented, such as its development with elements of Artificial Intelligence. The entire complex of systems in this collaborative robot can be effectively used in the implementation of transport operations combined with medical care. This will significantly improve the quality of service on the one hand and facilitate the work of medical teams.

The article shows the implementation of a mobile robotic platform called Roby1, which is a prototype for creating a service robot based on it. Based on the obtained kinematic model, the implemented feedback sensors are shown. Controlled power supply of the robotic system based on the use of a hydrogen fuel cell has also been implemented. The control system for the used DC motors has been implemented, which shows the advantages of the chosen movement scheme. After creating the prototype of the mobile robotic platform Roby1, its characteristics were carefully studied and thus some noticeable shortcomings were eliminated. All this shows a fully completed mobile robotic platform that is able to provide movement in the working environment and overcome possible obstacles to completing the task (Zahariev, 2019).

The creative team that implemented the robot is ready to move on to upgrading the control system. By implementing intelligent control of the entire robot system, it will be able to perform a number of activities related to servicing patients in need of a quick transport operation to medical institutions. The use of elements of artificial intelligence in the processes of recognizing situations that arise during the robot's actions in a disordered and dynamically changing environment will offer opportunities for the robot to be able to make intelligent decisions at a tactical level. In addition, successful communication will be maintained with the supervisor or with some other users, who will be able to set certain tasks for execution through the use of voice communication. Of course, all this will be implemented on the basis of the created Collaborative Mobile Robot, called Robi1, presented in this article.

Acknowledgement

The authors acknowledge the financial support of the project with an Administrative Contract under project No. BG-RRP-2.017-0011 "Ecological collaborative robots powered by green hydrogen" under the Recovery and Resilience Mechanism for the implementation of an investment under C2I2 "Increasing the innovation capacity of the Bulgarian Academy of Sciences (BAS) in the field of green and digital technologies" from the Recovery and Resilience Plan.

REFERENCES

- Angelov, G. et al. (2011). Remote interface communication to ROS based robotic system"; *Proceedings of the 21-rst International Conference Robotics and Mechatronics; "Invited Session - Austrian-Bulgarian Automation Day"*, 19-21 September; Varna Bulgaria; ISSN 1310-3946; pp. 22 – 27. <https://www.acin.tuwien.ac.at/fileadmin/acin/ijaa/ijaajg20h2.pdf#page=22>
- Borenstein, N., Johan, P., Qiang Feng, L. (1996). "Where Am I? Sensors and methods for positioning a mobile robot ". vol. 119.
- Horváth, D., Červeňanská, Z. (2021). Controlling the movement of a small mobile 3PI robot in a maze through a neural network using a backpropagation method. *Scientific Documents, Faculty of Materialology and Technology in Trnava, Slovenian Technological University of Bratislava*, 2021, Volume 29, No 49.
- Khatib, O., Moore, P. (1997). Sensor based control of robots. *Stanford University Publ, USA*.
- Paunski, Y., Zahariev, R. (2017). Service robots control system, based on "Arm cortex M" architecture microprocessor system, *Pr. TU Sofia, XXVI International Conference „ADP-2017“*, June, 2017, Sozopol, Bulgaria, pp. 300-304., <https://mf.tu-sofia.bg/MNTK%20ADP%20site/4%20Proceeding/2017/Materials/Napravlenie-7/4-7-R.Zahariev-2.pdf>
- Probst, R., Kopacek, P. (1996). Service robots: present situation and future trends, *The second ecpd international conference on advanced robotics, intelligent automation and active systems*, Vienna, Austria, 1996, pp. 45-52. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017427376>
- Serpanos, D. (2018). The cyber-physical systems revolution. *J. Computer*, V.51(3), 2018, pp. 70-73., DOI: <https://doi.org/10.1109/MC2018.1731058>
- Siegwart, I., Roland, R. N. (2004). Introduction to Autonomous Mobile Robots. *London, England: MIT Press*.
- Valchkova, N., Zahariev, R. (2019). Optimization of model operator for service robot, intended to service persons with disability, *Pr. "TECIS-19" IFAC Conf.* Sozopol, Bulgaria., <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.468>
- Valchkova, N., Zahariev, R., Tzvetkov, V., Angelov, G., Totomirova, Cv., Paunski, Y. (2023). Approach to designing a mobile service collaborative robot for healthcare and disadvantaged people. *Proc. of the Intern. Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME 2023)*, IEEE, Tenerife, Canary Islands, Spain, IEEE, ISBN:979-835032297-2, <https://doi.org/10.1109/ICECCME57830.2023.10252774>
- Valchkova, N., Zahariev, R., Totomirova, Cv. (2023). Establishing a model synthesis method of a mobile platform for service collaborative robot, *Proceeding III. International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET 2023)*, IEEE, Cape Town-South Africa, <https://doi.org/10.1109/ICECET58911.2023.10389391>



- Valchkova, N., Zahariev, R. (2019). Optimization of model operator for service robot, intended to service persons with disability. *Pr. "TECIS-19" IFAC Conference on International Stability, Technology and Culture*, 26-28 September, Sozopol, Bulgaria, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.468>
- Zahariev, R., Valchkova, N., Angelov, G., Paunski, Y. at al. (2019). Robots for help in pedagogy and rehabilitation. *In Pr. 20-th Int. Conf. on Computer Systems and Technologies, ACM*, New York, NY, 2019 USA, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1145/3345252.3345253>

Prof. Roman Zahariev, PhD

ORCID iD: 0000-0002-9914-3284

Bulgarian Academy of Sciences, Institute of Robotics
Sofia, Bulgaria

E-mail: roman.zahariev@abv.bg

Assoc. Prof. Nina Valchkova, PhD

ORCID iD: 0000-0002-8942-7021

Bulgarian Academy of Sciences, Institute of Robotics
Sofia, Bulgaria

E-mail: nvalchkova@abv.bg



ENGINEERING STUDY OF THE POSITIONING ACCURACY OF MODULES FOR INDUSTRIAL ROBOTS

Tatyana Vakarelska

Technical University of Sofia, Technical College, Bulgaria

Izabela Radkova

University of Forestry of Sofia, Bulgaria

Abstract. Positioning repeatability is the deviation (dispersion) of the gripper of industrial robots, of their translation or rotation modules relative to a theoretical point precisely set by the program. These points must be reached with high accuracy when the program is repeated. When creating new building blocks (modules) for the construction of industrial robots and the parameters set in the technical specifications, it is necessary to carry out checks according to a certain methodology. Positioning accuracy is one of the main parameters of robots (especially for assembly activities) for the quality performance of various operations in the automation of discrete production.

Keywords: engineering studies, industrial robot, deviations, modules, positioning repeatability accuracy

1. Introduction

In a market economy, the issue of the quality of manufactured products and their low cost are gaining importance due to the growing competition between companies.

Discrete production processes in industrial production are diverse, which makes it difficult to automate them. In mechanical engineering and the woodworking industry, there is a wide variety of products for the automated production of which industrial robots play an important role, performing basic and auxiliary operations. The implementation of robot manipulators is especially relevant when it is necessary to ensure high speed of movement of the manipulated object, its accurate positioning in space and stable repetition of cycles of working movements in time.

When determining the desired spatial position of the robot's end link, it is necessary to ensure a number of conditions and take into account the previously set restrictions. The object moved by the robot must move at a certain speed, have a certain positioning accuracy, and its trajectory must take into account the possibility of collision with other production objects. The kinematic and dynamic characteristics of the robot itself, arising under the influence of loads when performing functional tasks, are also important (Chuev, 2019; Chuprova, 2013).

The object of study is a robot-manipulator working in woodworking, performing linear movements, and to determine the repeatability accuracy of positioning. Position repeatability is the ability of the robot to return to the same point in space when a given movement is repeated many times. This parameter is important for ensuring quality and productivity in a wide range of industrial applications. It is expressed as a deviation from the target position in millimeters ($\pm\text{mm}$).

The positioning accuracy of an industrial robot is determined by measuring the deviation of the actual position of the positioning point from the calculated position set by the program, i.e. it is quantitatively assessed by the positioning error, determined by the magnitude of the deviation between the coordinates of the actual position of the positioning point and the program-specified coordinates of a similar point.

The accuracy of the gripper of the manipulator robot is the maximum linear deviation from a preset service point in the working area, with a pre-created control cycle (0.01 [mm] – 5 [mm]). This determines the possibility of using an industrial robot to automate a certain production process. It is important to test the errors, accuracy and repeatability of an industrial robot in a specific production environment (Płaczek, 2021).

The positioning accuracy of industrial robots has an important impact on the stability and accuracy of robotic movement, which is one of the important indicators for measuring the performance of robots. Currently, some methods based on probability theory are used to assess the reliability of the positioning accuracy of industrial robots (Zhang, 2020). The aim is for the end link of the module (the gripper) to reach a specific programmed position with minimal error (dispersion).

Geometrically, the position accuracy of the robot for a given point in its working area is defined as the distance between the desired position and the average position of all points in all coordinate directions, which is actually achieved after repeated movements of the end link to the initial desired position (Fig. 1).



Fig.1. 2D illustration of the geometric meaning of repeatability accuracy

According to the BDS EN ISO 9283 standard, the accuracy of unidirectional positioning describes the deviation between the target position and the average value of the actual positions when reaching the target position from the same direction (Slamani, 2012). Table I presents the levels of repeatable positioning accuracy of industrial robots.

Table I. Robot groups unidirectional position accuracy

Class	Category	Range[mm]
0	super accurate	$\pm 0,001$; $\pm 0,01$
I	very accurate	$\pm 0,01$; $\pm 0,1$
II	with increased accuracy	$\pm 0,1$; $\pm 0,5$
III	with normal accuracy	$\pm 0,5$; ± 1
IV	with low accuracy	$> \pm 1$

The accuracy of the manipulator and the robot movement system is characterized by the resulting error in positioning (with discrete movement) or the execution of a given trajectory (with continuous movement).

Most often, the accuracy of robots is characterized by an absolute error, and for general-purpose robots, the accuracy is divided into three ranges: small - with a linear error of 1 [mm] or more; medium - with an error of 0.1 to 1 [mm]; high - with a smaller linear error. Robots performing transport auxiliary movements are most often from the first range. With an increase in the manipulator stroke, the accuracy decreases.

2. Methodology for experimental determination of positioning repeatability accuracy

To determine the accuracy of repeatability in positioning, various measuring equipment and methods are used - direct measurement of errors, a training method, using a flat trajectory template, a laser method, with video cameras. They are used to test and specify certain characteristics of manipulation, measurement of the location of the end link, accuracy, repeatability, calibration, etc. (Conrad, 2000; Petkova, 2021).

The purpose of testing industrial robots is to establish the operational characteristics for performing auxiliary operations for feeding workpieces and parts to machine tools and comparing these characteristics with the prospect data of modular robots. To implement the engineering study, the following more typical actions are performed (Chakarski, 2008):

- establishing the range of movements - the initial and final positions of the movements are determined.
- determining the speeds of the movements - the maximum and operating speeds of movement are established for all types of movements.
- Checking the useful load capacity - at different values of the load capacity and the speed of movement, it is established whether the feed accuracy is within the required limits.
- Determining the actual positioning accuracy in the working area of the robot, i.e. checking at characteristic points, by making measurements along the axes and calculating the value of the deviation (scattering) for each direction.
- Determining the deviations with an indicator clock and establishing their average value by working with specific objects and the module executing a real cycle.
- Checking the correct execution of the cycle of the robot building module.
- Determining the normal distribution of the deviation along the specific axis.

Positioning accuracy is the maximum deviation from a preset point during the execution of one cycle of a given module or industrial robot.

The methodology chosen for conducting the tests includes certain stages (Chakarski, 2008):

- Implementation of measurements for repeatability accuracy in positioning (dispersion ΔX) upon reaching a selected theoretical point of the module cycle, both in horizontal and vertical positions. The measurements can be at least 20 or 50 pieces;
- Systematization in tabular form of the values of ΔX from the measurements;
- Calculation of the arithmetic mean deviation ΔX_{av} with the formula:

$$\Delta X_{av} = \frac{\sum_{i=1}^{50} (\Delta X_i)}{50} \quad (1)$$

- The range of measured deviations $\Delta X_{\min} \div \Delta X_{\max}$ is divided into 10 equal intervals;
- For each interval, the frequency of occurrence of ΔX is determined;
- The difference for each interval is calculated:

$$(\Delta X_{av} - \Delta X_{i\ av}) \quad (2)$$

where ΔX_{iav} – is the average value of the i th element, $i = 1 \div 10$;

- Merging the difference according to the formula:

$$(\Delta X_{av} - \Delta X_{i\ av})^2 \quad (3)$$

- Calculating the mean square deviation σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\Delta X_{av} - \Delta X_{i\ av})^2}{10}} \quad (4)$$

- Calculating the function of the normal disperse Y :

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta X_{av} - \Delta X_{iav})^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

- The histogram n is constructed

$$n = f(\Delta X_{i\ av}) \quad (6)$$

where n [num] is the frequency of occurrence for each interval and the normal distribution function

$$Y = f(\Delta X_{i\ av}) \quad (7)$$

An experimental study of the repeatability accuracy of a linear motion module of a robot operating in a woodworking plant performing feeding and unloading operations has been conducted. The module under study has a load capacity of up to 30 [kg], a design repeatability accuracy of positioning of ± 2 [mm], and a stroke length of up to 1500 [mm].

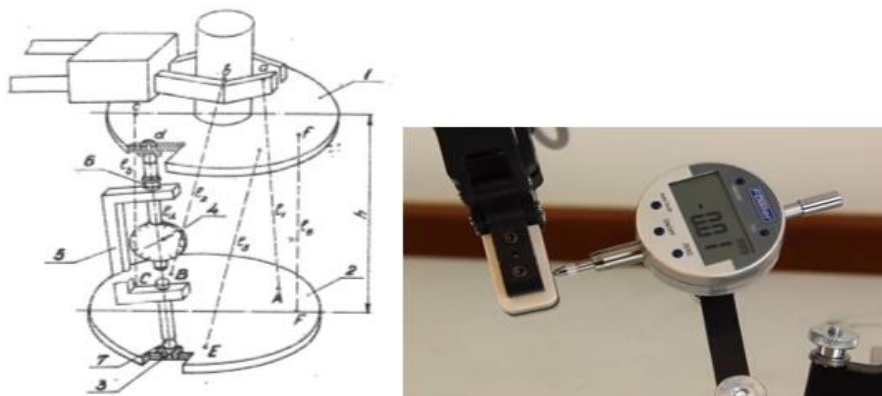


Fig. 2. Scheme for testing positioning accuracy: 1,2 – positions of the final executive unit; 3 – mandrel; 4 – indicator clock with an accuracy of 0.01 mm for reading linear displacements; 5,6,7 – fastening elements of the indicator

The experiments on repeatability accuracy in positioning a linear module were conducted at a maximum module speed of 0.8 [m/s]. Fig. 2 illustrates a schematic of the experimental setup.

3. Analysis of the results of the experimental study of the module during vertical and horizontal displacement

To assess the static accuracy of the robot's motion, position measurements are performed after the end effector motion has completely stopped (regardless of the path traveled to reach the desired position) from the previous position of the end effector.

After performing 50 forward or downward movements of the module, the results of the indicator are recorded, which is previously reset when the module is set to the forward or downward position before starting the experiments.

The area between the two extreme values of the deviation (positive and negative) is divided into 10 intervals, after which, according to the above methodology, tables are filled in and the results are analyzed.

- Results of the experimental studies on repeatability accuracy in positioning with horizontal arrangement of the module (table II). The scheme of the experimental setup is according to Fig.2, but arranged horizontally.

According to formula (1) and the measurement results, ΔX_{av} is calculated:

$$\Delta X_{av} = \frac{\sum_{i=1}^{50} (\Delta X_i)}{50} = 0,57$$

Using the methodology, the difference $(\Delta X_{av} - \Delta X_{i\text{sv}})$ is calculated by formula (2), and by formula (3) $(\Delta X_{av} - \Delta X_{i\text{sv}})^2$ is determined and the results are plotted in table II.

Table II. Results for horizontal movement of the module

<i>Interval №</i>	<i>Interval [mm]</i>	<i>Frequency of occurrence n [number]</i>	<i>$(\Delta X_{av} - \Delta X_{iav})$</i>	<i>$(\Delta X_{cp} - \Delta X_{icp})^2$</i>	<i>Y</i>
1	-1,68 ÷ -1,35	1	2,07	4,28	0,37
2	-1,34 ÷ -1,01	1	1,73	2,99	0,55
3	-1,00 ÷ -0,67	5	1,39	1,93	0,72
4	-0,66 ÷ -0,33	5	1,05	1,10	0,82
5	-0,32 ÷ 0,01	8	0,71	0,50	0,90
6	0,02 ÷ 0,35	12	0,37	0,14	0,95
7	0,36 ÷ 0,69	9	0,03	0,01	0,99
8	0,70 ÷ 1,03	5	-0,31	0,10	0,95
9	1,04 ÷ 1,37	3	-0,65	0,42	0,91
10	1,38 ÷ 1,70	1	-0,97	0,96	0,82

The arithmetic mean deviation is determined by formula (4).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\Delta X_{av} - \Delta X_{iav})^2}{10}} = 1,114$$

After admitting the value Y with equation (5) and putting the results in Table II, the histogram $n = f(\Delta X_i \text{ av})$ (where n [numbers]) is the frequency of appearance for every interval) and the function of the normal distribution $Y = f(\Delta X_i \text{ av})$ are shown in Fig. 2.

After admitting the value Y with equation (5) and putting the results in Table II, the histogram $n = f(\Delta X_i \text{ av})$ and the function of the normal distribution $Y = f(\Delta X_i \text{ av})$ are shown in Fig. 3.

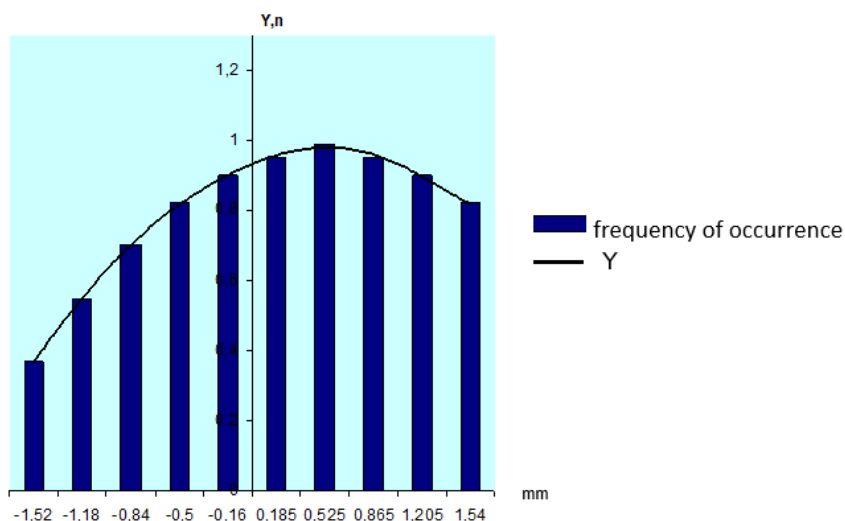


Fig. 3. Results of experiments with horizontal movement of the module

- Results of the experimental studies on repeatability accuracy in positioning during vertical movement of the module (Table III). The scheme of the experimental setup is according to Fig.2.

$$\Delta X_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{50} (\Delta X_i)}{50} = 0,29$$

Following the methodology, the difference is calculated $(\Delta X_{av} - \Delta X_{iav})$ with equation (2), and with equation (3) - $(\Delta X_{av} - \Delta X_{iav})^2$. The results are recorded in Table III. With equation (4), σ is admitted:

Table III. Results with vertical module placement

Interval №	Interval [mm]	Frequency of occurrence n [number]	$(\Delta X_{cp} - \Delta X_{icp})$	$(\Delta X_{cp} - \Delta X_{icp})^2$	Y
1	-0,67 ÷ -0,49	1	0,87	0,76	1,10
2	-0,48 ÷ -0,30	4	0,68	0,46	1,44
3	-0,29 ÷ -0,11	7	0,49	0,24	1,71
4	-0,10 ÷ -0,08	11	0,30	0,09	1,89
5	0,09 ÷ 0,27	10	0,11	0,01	1,99
6	0,28 ÷ 0,46	8	-0,08	0,01	1,99
7	0,47 ÷ 0,65	4	-0,27	0,07	1,91
8	0,66 ÷ 0,84	2	-0,46	0,21	1,75
9	0,85 ÷ 1,03	2	-0,65	0,42	1,20
10	1,04 ÷ 1,22	1	-0,84	0,70	1,10

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\Delta X_{av} - \Delta X_{iav})^2}{10}} = 0,548$$

After calculating the normal distribution function of Y according to formula (5) and putting the results in Table III., the histogram $n = f(\Delta X_{iav})$ and the normal distribution function $Y = f(\Delta X_{iav})$ are constructed, shown in Fig.4.

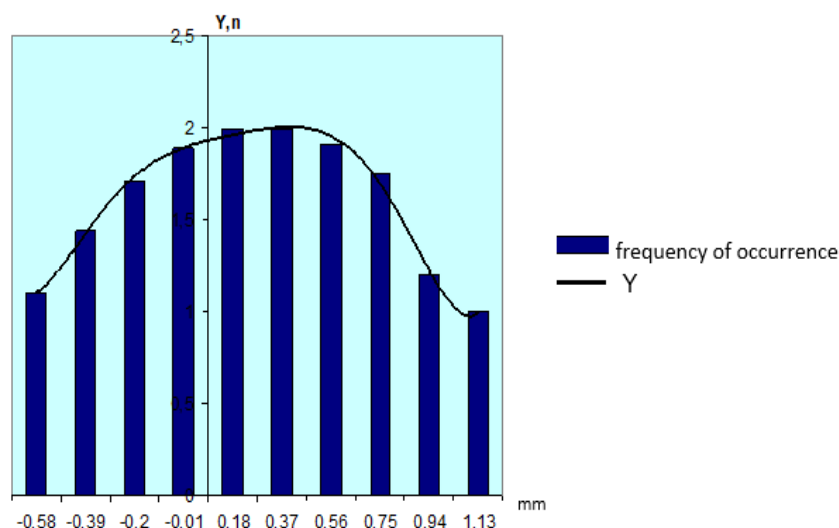


Fig. 4. Results of experiments with vertical movement of the module

4. Conclusions

- The larger area of dispersion of the error when positioning the module in a horizontal position is due to:
 - greater influence of friction forces in the guide bushings of the guides and the piston rod of the pneumatic cylinder when moving at a slow speed at the end of the module stroke;
 - influence of sagging of the front end of the module due to the large stroke (1500 mm);
 - slow damping of vibrations after stopping the movement (measurement is carried out between the first and third seconds after stopping);
- Most of the positive values in both cases were obtained towards the end of the experiments, which is most likely due to a decrease in friction forces as a result of the increase in temperature in the guide elements;
- The maximum deviation in horizontal position is $\pm 1.7\text{mm}$, and in vertical position is $\pm 1.22\text{mm}$, which are less than the design accuracy for this module, namely $\pm 2\text{ mm}$.
- The results show that the positioning accuracy fully corresponds to the feed accuracy of the PR for machining and other technological operations

REFERENCES

Chakarski, D., Vakarelska, T. (2008). Engineering studies. *Publish House of Technical University* [in Bulgarian]. ISBN 978-954-438-709-9

- Chakarski, D., Vakarelska, T. (2008). Automation devices. *Publish House of Technical University* [in Bulgarian]. ISBN 978-954-438-708-2
- Chakarski, D., et al. (2003). Industrial robots, robotic technology modules and systems, part 1, part 2. *Publish House of Technical University* [in Bulgarian]. ISBN 954-438-399-9
- Chuev, K., Cherkasov, V. (2019) Chueva Yu.A. Solution of the direct position problem for the industrial robot "TUR-10" [Reshenie pryamoj zadachi o polozheniiyax dlya promy`shlennogo robota "TUR-10"], *XI International Youth Forum "Education. the science. production" Forum materials*. Belgorod, pp. 944–949
- Conrad, K., Shiakolas, P., Yih, T. (2000). Robotic calibration issues: Accuracy, Repeatability and Calibration, *Proceedings of the 8th Mediterranean Conference on Control and Automation*, (MED 2000) Rio, Patras, Greece
- Petkova, K.; Tashev, M. (2021). Accuracy and repeatability of positioning – classification of the causes of inaccuracies of robots, *XXX MNTK "ADP 2021", Sozopol, Magazine "Automation of discrete production"*, Issue 1/July 2021, ISSN: 2682-9584, pp. 95–98
- Plączek, M., Piszczek, L. (2018). Testing of an industrial robot's accuracy and repeatability in off and online environment. *Eksplatacja i Nieza-wodnosc – Maintenance and Reliability*, vol. 20 (3): 455–464, DOI:10.17531/ein.2018.3.15, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2018.3.15>
- Radkova, I. (2019). Using Programmable Logic Controllers in Automated Mechanronic Systems for the Production of Children's Toys from Solid Wood. *KNOWLEDGE - International journal, Scientific Papers*, Vol. 35. 3. Natural and mathematical, technical and technological and biotechnical sciences, Skopje, ISSN 2545 – 4439(p), ISSN 1857 – 923X(e), pp.1039–1044 (Global Impact Factor 2018 1.822)
- Slamani, M., Nubiola, A., Bonev, I. (2012), Assessment of the Positioning Performance of an Industrial Robot, *Industrial Robot the international journal of robotics research and application* Vol. 39, No. 1, pp. 57–68, École de technologie supérieure, Montreal (Quebec), Canada. DOI:10.1108/01439911211192501
- Tolov, S., Dimitrova, R., Nikolov, S. (2024), Research of the positioning accuracy of a specialized robot with parallel kinematics, *XXXIII MNTK "ADP - 2024", Sozopol, Magazine "Automation of discrete production"*, Issue 6 /July 2024, ISSN: 2682-9584, pp. 45–48.
- Zhang, D., et al. (2020). Positioning Accuracy Reliability of Industrial Robots Through Probability and Evidence Theories, *Journal of Mechanical Design*, vol. 143(1):1–30, DOI:10.1115/1.4047436

Assoc. Prof. Tatyana Vakarelska, PhD

ORCID ID: 0009-0005-2254-4265

Scopus Author ID: 5721192738

Technical University of Sofia. Technical College
Sofia, Bulgaria

E-mail: vakarelska@tu-sofia.bg

Ch. Assis. Izabela Radkova, PhD

University of Forestry

Sofia, Bulgaria

E-mail: izabelarad@abv.bg

ОБЗОР НА КРАЧЕЩИ РОБОТИ В ЗАВИСИМОСТ ОТ БРОЯ НА КРАКАТА

Алдин Хаджиев

Технически Университет София, България

Резюме. Настоящата статия разглежда различните групи крачещи роботи. Направен е литературен обзор на видовете крачещи роботи с различен брой крайни механизми, като са показани примери с техните конструктивни особености и характеристики. Разгледани са първите създадени крачещи роботи и са направени изводи за тяхното движение в зависимост от броя на краката.

Ключови думи: крачещ робот, крак, обзор, мехатроника, движение

Увод

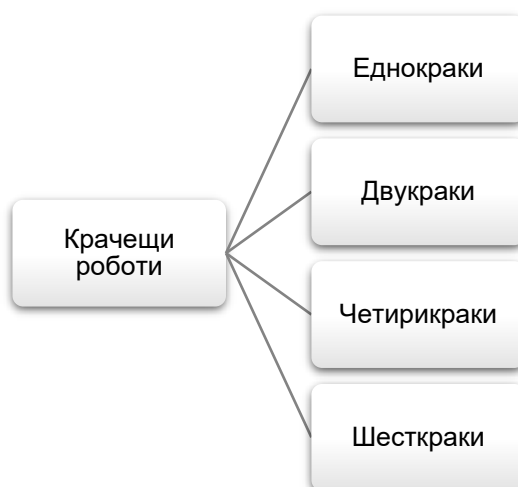
Крачещите роботи използват различен брой крайни механизми (крака), за да се придвижват от едно място на друго. Краката играят ролята на окачаване, като по този начин движението на основното тяло е независимо от профила на терена. С всяка стъпка, определен крак се повдига за определен период от време, като по този начин неравен терен може също да бъде преодолян, позволявайки придвижване през труднодостъпни терени.

Краката обикновено са шарнирни твърди тела, които влизат в контакт с околната среда чрез своята крайна долна част. Този контакт е едностранен, което означава, че роботът се избутва чрез краката си, но не може да се издърпва, чрез повърхностите с които краката контактуват. В някои случаи, различни хващащи механизми - вендузи, магнити, лепливи материали и други е възможно да осигуряват допълнително сцепление с повърхността.

Управлението на роботи с крака е сложно и предизвикателно, защото за разлика от индустриалните роботи, те имат множество входни и изходни сигнали които влияят върху движението на робота. (Semini, 2020)

2. Обзор на крачещи роботи

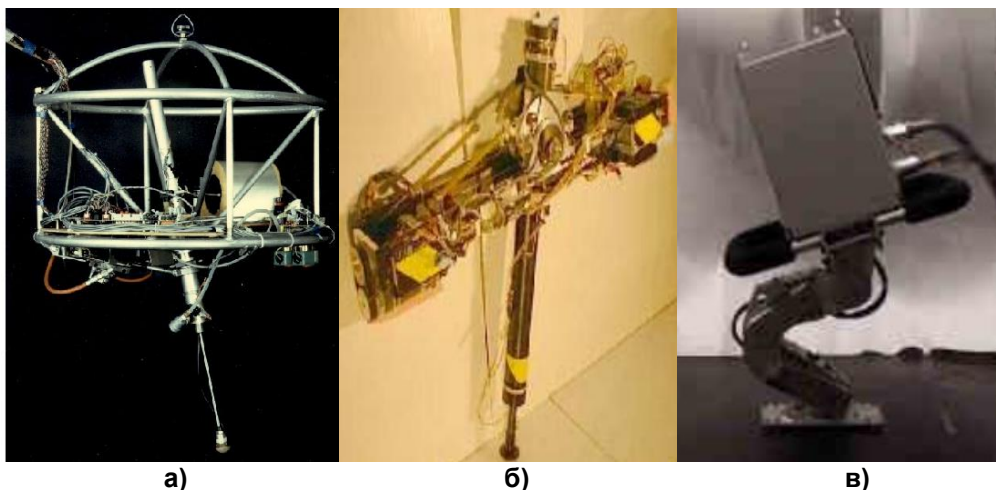
Крачещите роботи, в зависимост от броя на краката условно могат да се разделят на четири групи, показани на фиг. 1.



Фиг. 1. Групи крачещи роботи

2.1. Еднокраки роботи

Тези роботи са познати още като скачащи роботи. При тях движението се осъществява чрез скачане. Най-близкият пример от природата за такъв вид движение е това на кенгуруто, което може да се използва и за движение на двукраки роботи. При тях преместването варира между това във всеки един момент един крак да контактува с повърхността, върху която се извършва преместването или за определен период от време нито един от краката да не контактуват с повърхността, при по-бързо движение.



Фиг. 2. Скачащи роботи: а) Raibert (Machado, 2006); б) ARL Monopod II (Ahmadi, 1999) и в) TTI Hopper (Communications of the ACM, 2025)

През 80-те години на XX век Raibert създава два прототипа на еднокраки роботи. За осигуряване на стабилност и двата робота са в постоянно движение, тъй като тялото носещо всички актуатори и задвижващи механизми се балансира от един крак, задвижван от пневматичен цилиндър с пружина. Така създаденият крак от Raibert може да бъде с променлива дължина, като по време на работа и двата робота са скачали постоянно, за да поддържат баланс. Първият робот е ограничен от това, че се придвижва единствено в една равнина, като чрез скачане се движи напред и назад, както и ротира около оста си. Вторият робот показан на Фиг.2а има допълнителни възможности за придвижване, а именно движение наляво и надясно. Захранването и управлението се осъществява от външен източник чрез кабел (Machado, 2006).

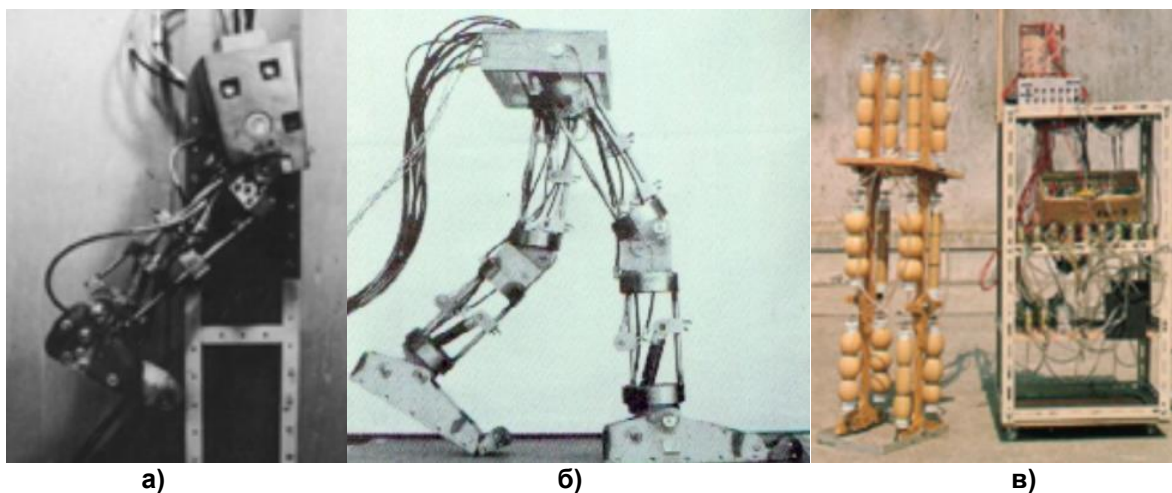
Друг пример за еднокрак робот е ARL Monopod II (Фиг.2б). Тялото е свързано с призматичен крак чрез ставна връзка, като този тип конструкция е ограничена да се движи във вертикална равнина. Има височина от 700 [mm] и тегло от 18 [kg]. За разлика от роботите на Raibert, при ARL Monopod II актуаторите са електрически (Ahmadi, 1999).

През 2025, японски учени от Toyota Technological Institute (TTI) разработват еднокрак робот, използвайки обикновени DC двигатели с редуктори и сензори за измерване на сили и натоварвания (Фиг.2в). Алгоритъма за управление успешно компенсира ограниченията от използването на нискостойностни компоненти. Разработеният робот, според учените се справя с предизвикателни ситуации, като промяна на наклона по време на движение или създадени инерционни сили, ако е поставен на движеща се повърхност (New Scientist Ltd, 2025).

2.2. Двукраки роботи

През последните десетилетия, двукраките роботи привличат все повече внимание от тези с колела. Въпреки това, малко типове човекоподобни роботи са вече внедрени в ежедневиия живот на хората или в различни специфични индустрии. Повечето от успешните разработки на двукраки роботи са ограничени да работят в добре структурирана работна среда. Реалните приложения изискват, робота да се намира в стабилно положение по време на работа, докато се справя с всички външни непредвидени въздействия. Малки отклонения от предвидената работна среда, могат да нарушат баланса и сериозно да намалят стабилността на двукраките роботи (Ye Xie, 2020).

Въпреки трудностите, свързани с осигуряване на стабилен контрол и управление, са направени редица експерименти с двукраки роботи. През 60-те години на XX век японски учени разработват множество двукраки роботи, с цел да създаване на такъв, който да извършва ръчен труд.

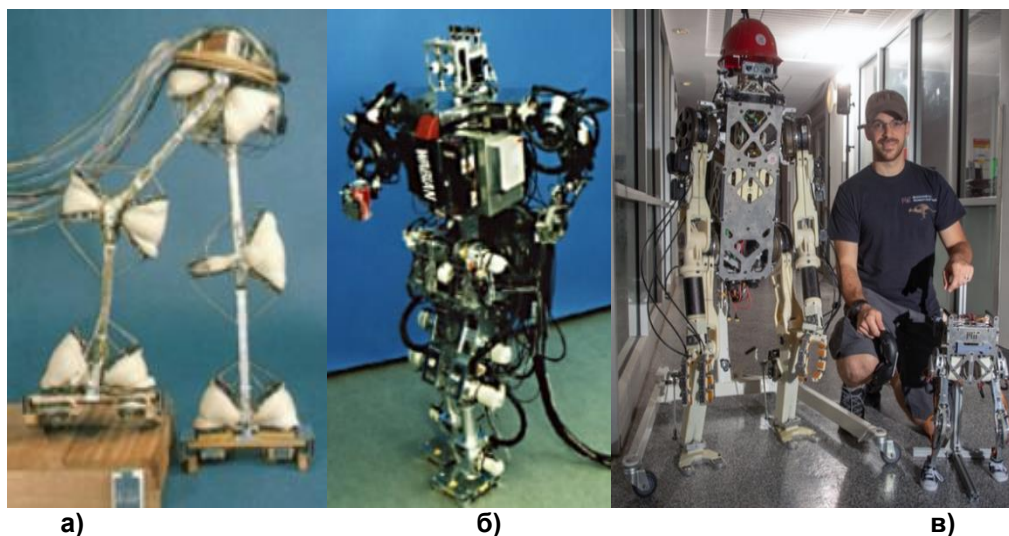


Фиг. 3. Двукраки роботи: а) WL-1 (1966-1967) (Humanoid Robotics Institute, Waseda University, 2025); б) WL-3 (1968-1969) (Takanishi Laboratory, 2025) и в) WAP-1 (1969) (Takanishi Laboratory, 2025)

Първият робот от серията, разработени в университета Waseda (Фиг.3а) е наречен WL-1, като той имитира начина на движение на човека. Подобрена версия на WL-1 е WL-3 (Фиг.3б), която е с електро-хидравлични серво актуатори, а управлението е чрез метода „master-slave“. Този робот успешно реализира човекоподобно придвижване, включително клякане и ставане.

Следваща разработка на университета Waseda е робот с приложение на изкуствени мускули, използвани за актуатори. Така робота има възможност за придвижване само в една равнина, като изпълнява единствено предварително зададени команди (Takanishi Laboratory, 2025).

Първият робот, движещ се в 3D пространство е WAP-3, показан на фиг.4а. Чрез контролиране на центъра на тежестта на робота, той може да се придвижва по стълби, чрез използване на серво актуатори. Робота WABIAN (Фиг.4б) е създаден с цел да се изследва взаимодействието между хора и роботи. Той е проектиран с височината и скоростта на придвижване на човек, а именно тегло 136 [kg] и височина 1,97 [m]. WABIAN има възможност да събира информация чрез звук и камери, поставени на главата (Takanishi Laboratory, 2025).

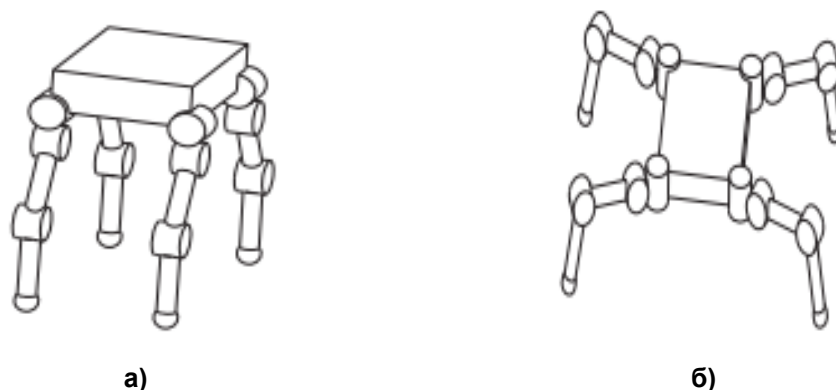


Фиг. 4. Двукраки роботи: а) WAP-3 (1971) (Takanishi Laboratory, 2025); б) WABIAN (Takanishi Laboratory, 2025) и в) Робот „Hermes“ (Massachusetts Institute of Technology, 2025)

През 2019 г. учени от Massachusetts Institute of Technology успешно създават двукрак робот (Фиг.4в,) който следи и възпроизвежда действията и движенията на човек чрез специална ризница. След редица итерации, тестове и промени по управлението на робота, той успява успешно да следи и възпроизвежда действията и движенията на човек. Чрез специалната ризница, оператора може да задава команди и да получава обратна връзка за състоянието на робота. При загуба на баланс на робота, оператора може да възстанови стабилното му състояние. (Massachusetts Institute of Technology, 2025).

2.3. Четирикраки роботи

Това е тип крачещ робот, който има по-добра товароносимост и по-добра стабилност спрямо двукраките роботи. В същото време притежава повече размах на придвижване, по-проста конструкция и по-лесно програмиране спрямо многокраките роботи.



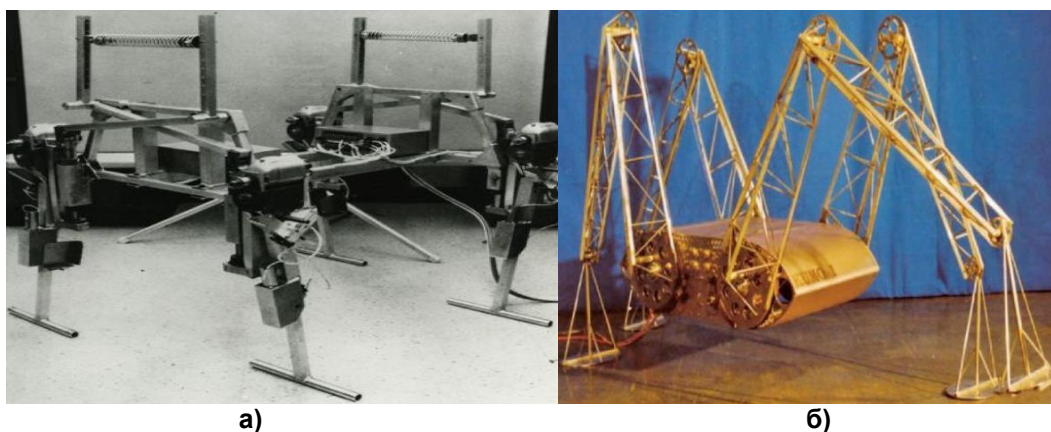
Фиг. 5. Видове четирикраки роботи с шарнирни крака: а) Mammal-type robot и б) Sprawling-type robot (Yuhai, 2019)

При четирикраките роботи има два различни вида разположение на краката – призматично и шарнирно.

Призматичното разположение на краката е с една основна, въртяща се става, която е закрепена за тялото и закрепен към нея хидравличен цилиндър.

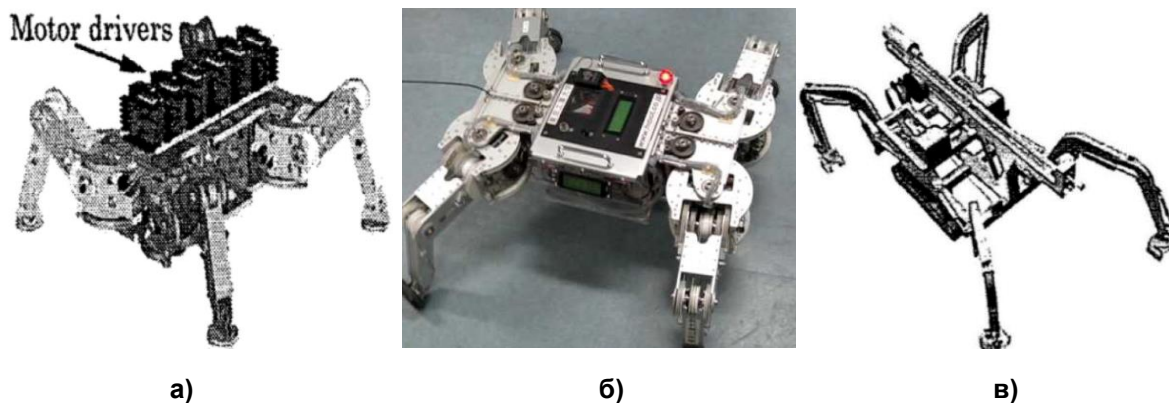
За движение и контрол, шарнирното разположение на краката използва единствено въртящи се стави. Това разположение на краката се дели на два подвида. При първият подвид (Фиг. 5а), въртящия момент в ставите е малък по време на движение и при пасивна изправена позиция няма натоварване в ставите. При вторият подвид (Фиг. 5б), първия елемент от краката в стандартна статична позиция е хоризонтален, а втория е вертикален, което позволява контрол на центъра на тежестта чрез контролиране на позицията на тялото на робота във вертикално направление (Yuhai, 2019).

Първият автономен четирикрак робот в САЩ е създаден през 1960 година и е наречен „Phony pony“ (Фиг. 6а). Всеки крак на робота притежава две идентични въртящи стави, като това позволява той да ходи с нормална скорост, но също така и да тича. Заради формата на обърнато Т на стъпалата, робота може да стои изправен.



Фиг. 6. Автономни роботи: а) робот „Phony pony“ (Biswal,2021) и б) робот „KUMO-1“ (Biswal, 2021)

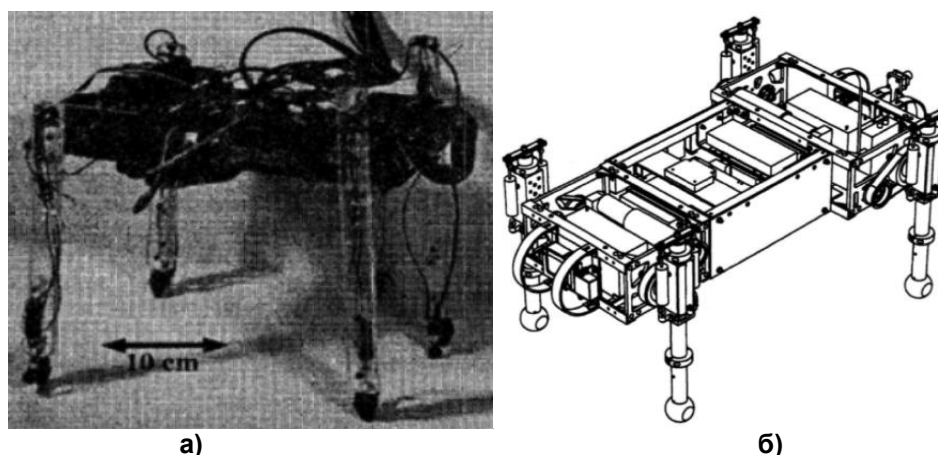
През 1976 г. Shigeo Hirose и Kato правят голяма стъпка в развитието на четирикраките роботи със създаването на робота „KUMO-1“ (Фиг. 6б). Той е паяко подобен робот с тегло от 14 [kg] и дължина 1.5 [m]. Всеки крак има по един двигател със съединител, за да може да се осъществява движение.



Фиг. 7. Роботи от серията „TITAN“: а) TITAN III; б) TITAN VII и в) TITAN XII (Biswal, 2021)

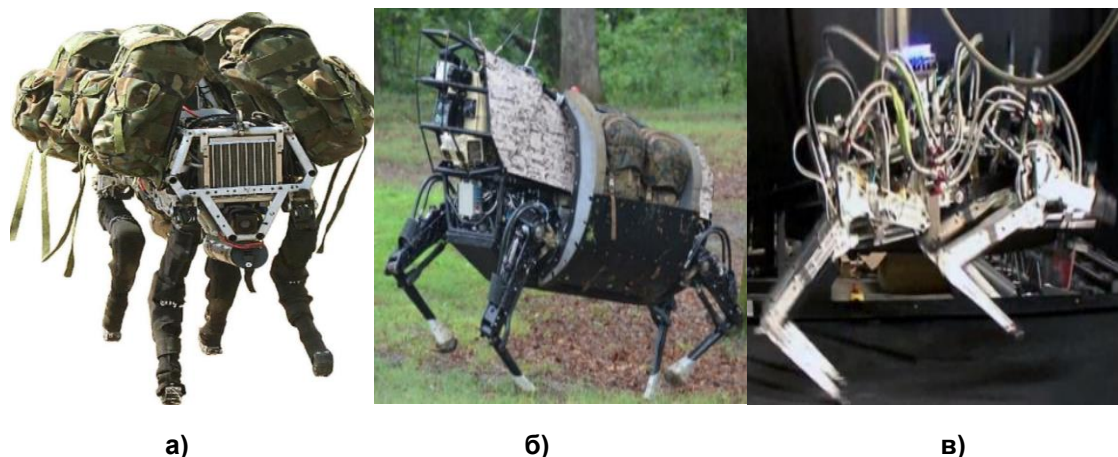
През 20-те години на XX век Shigeo Hirose създава серията от роботи наречена TITAN. Серията започва с TITAN III (Фиг. 7а), в който 3D пантограф е включен в крачен механизъм. Този робот се превръща в първият изкачващ се робот. В следващите итерации на серията TITAN се добавят някои допълнения, като в същото време се изследва промяната на различни параметри и използването на различни механизми.

Впоследствие проектирането на четирикраки роботи става масово и се появяват роботите Скаут 1 и Скаут 2, показани на фиг.8.



Фиг. 8. Роботи от серията „Scout“: а) Скаут 1 и б) Скаут 2 (Biswal, 2021)

Най-новите разработки на четирикраки роботи, включват две серии наречени BIG DOG 1 (фиг.9а) и BIG DOG 2 (фиг.9б), които са проектирани от USA Defence Advanced Research Project Agency (DARPA).



Фиг. 9. Роботи от серията „BIG DOG“: а) BIG DOG 1; б) BIG DOG 2 (Biswal, 2021) и в) робот „Chetah“ (Biswal, 2021)

Всеки от краката на роботи, задвижвани чрез хидравлика притежава четири степени на свобода. Други по-нови разработки са серията Chetah (фиг.9в), които са сред най-бързите четирикраки роботи, достигащи скорост около 45 [km/h], но единствено в лабораторни условия и захранване от външен източник (Biswal, 2021).

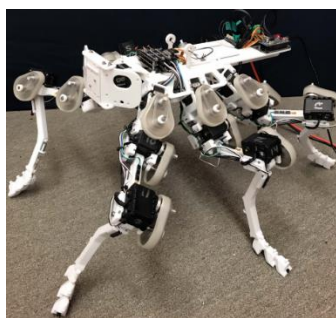
2.4. Шесткраки роботи

Това са тип многокраки роботи, които са с по-голяма стабилност от четирикраките роботи, но с по-усложнена конструкция и управление. За разлика от по-горе изброените типове роботи, при които има само един начин за придвижване на робота (или два при четирикраките), при шесткраките роботи се използват няколко различни начина на придвижване. Шесткраките роботи могат да бъдат разделени на два вида. Първия вид са двустранно правоъгълно симетрични, при които краката са разположени симетрично от двете страни на тялото и всяка страна притежава по три крака.

Втория вид са кръгово симетрични, при които краката са разположени в шестоъгълна или кръгова структура.

За да се определи най-добрата последователност за повдигане и спускане на краката е необходимо планиране на начина на походката. Шесткраките роботи могат да се придвижват чрез динамична походка или чрез статично стабилна походка, която е по-подходяща за по-бавни скорости. Пример (Zhiying Wang, 2011) за статично стабилни походки са:

- Tripod gait – едновременно три крака се движат, а останалите три осигуряват стабилност на робота.
- Quadruped gait – два срещуположни крака, се повдигат и се движат напред, а останалите четири подържат тялото и едновременно с това се движат назад, като по този начин изтласкват тялото напред. Обикновено при първия цикъл, водещите крака се придвижват напред, във втория се придвижва втората двойка, а в третия се придвижва третата срещуположна една на друга двойка крака.
- One-by-one gait – краката се движат един след друг. Когато един крак се придвижва напред, останалите са в покой.
- Free Gait – движение при което липсва фиксирана последователност, а начина на движение се настройва спрямо повърхността за придвижване. Това е изключително сложен начин на движение, но дава възможност за движение по-сложни и труднодостъпни терени. (Types of robot gait, 2025)



а)



б)

Фиг. 10. Робот „Drosophibot“ (Goldsmith, 2019) и робот „HAntR“ (Čížek, 2021)

Друг пример за шесткрак робот е роботът наречен Drosophibot, който е проектиран по подобие на насекомото плодова мушица (Фиг.10а). Роботът е разработен от учени от университета Case Western Reserve, като една от целите е той да бъде пропорционално уголемен спрямо взаимствания биологичен вид.

Задвижването е чрез серво двигатели, като предаването на движението не е директно от изходящия вал на двигателя, а се осъществява чрез допълнителна зъбна предавка, която удвоява въртящият момент на двигателите. Също така към ставите са добавени и пружини, които подпомагат двигателите и ги облекчават при удари и препятствия (Goldsmith, 2019).

Пример за шесткрак робот е робота HAntR (Фиг.10б), който е базиран на шесткрак робот PhantomX AX. При този робот всеки крак притежава четири степени на свобода, което подобрява движението, разпределението на тежестта между отделните крака и движението по наклонени повърхности. Роботът притежава товароносимост 85 % от собственото си тегло и може да се движи независимо около 1 час (Čížek, 2021).

3. Заключение

Анализираните типове крачеши роботи имат различни конструкции и са създадени за постигане на определени цели и идеи. Еднокраките роботи, помагат изключително много за развиването на крачещите роботи в първите стадии на развитие, но те не намират реално приложение в ежедневието и в индустрията. Двукраките роботи от своя страна са разработвани и развивани, за да заместят хората в опасни и трудни условия на труд. Тяхното развитие е свързано с предизвикателства и проблеми при осигуряване на контрол, управление и стабилност на конструкцията. Четирикраките и многокраките роботи позволяват по-голяма стабилност, по-лесен контрол и управление в сравнение с двукраките, но имат ограничен обхват от задачи, които биха имали полезно действие.

REFERENCES

- Ahmadi, Mojtaba & Buehler, Martin. (1999). The ARL Monopod II Running Robot: Control and Energetics. Available from: https://www.researchgate.net/publication/2764288_The_ARL_Monopod_II_Running_Robot_Control_and_Energetics/citation/download
- Claudio Semini, Pierre-Brice Wieber. Legged Robots. Encyclopedia of Robotics, Springer, pp.1-11, 2020, DOI: 10.1007/978-3-642-41610-1_59-1ff. fhal-02461604f Available from: <https://hal.science/hal-02461604v1/file/LeggedRobots.pdf>
- Communications of the ACM (2025), One-Legged Robot Hops About as Researchers Try Knocking It Over [viewed 09 March 2025]. Available from: <https://acmwebvm01.acm.org/news/255438-one-legged-robot-hops-about-as-researchers-try-knocking-it-over/fulltext>
- Goldsmith, Clarus & Szczecinski, Nicholas & Quinn, Roger. (2019). Drosophibot: A Fruit Fly Inspired Bio-Robot. DOI: 10.1007/978-3-030-24741-6_13. Available from: https://www.researchgate.net/publication/334269079_Drosophibot_A_Fruit_Fly_Inspired_Bio-Robot
- Humanoid Robotics Institute, Waseda University (2025), Biped Walking Robot [viewed 13 March 2025]. Available from: https://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_4.html

- Massachusetts Institute of Technology (2025), Two-legged robot mimics human balance while running and jumping [viewed 11 March 2025]. Available from: <https://news.mit.edu/2019/two-legged-robot-mimics-human-balance-while-running-jumping-1030>
- New Scientist Ltd. (2025), Watch a one-legged robot hop about as researchers try to knock it over, [viewed 09 March 2025]. Available from: <https://www.newscientist.com/article/2289362-watch-a-one-legged-robot-hop-about-as-researchers-try-to-knock-it-over/>
- Priyaranjan Biswal, Prases K. Mohanty, Development of quadruped walking robots: A review, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 12, Issue 2, 2021, Pages 2017-2031, Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447920302501#f0025>
- Takanishi Laboratory, Biped humanoid robot group (2025), [viewed 16 March 2025]. Available from: <http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/top/research/wabian/>
- Tenreiro Machado, José & Silva, Manuel. (2006). An Overview of Legged Robots. Available from: https://www.researchgate.net/publication/258972509_An_Overview_of_Legged_Robots
- Types of robot gait (2025), [viewed 13 March 2025]. Available from: <https://hexapodrobots.weebly.com/types-of-robot-gait.html>
- Ye Xie et al 2020 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1487 012048 DOI:10.1088/1742-6596/1487/1/012048, Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1487/1/012048>
- Yuhai, Zhong & Wang, Runxiao & Huashan, Feng & Chen, Yasheng. (2019). Analysis and research of quadruped robot's legs: A comprehensive review. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 16. 172988141984414. DOI: 10.1177/1729881419844148. Available from: https://www.researchgate.net/publication/332924140_Analysis_and_research_of_quadruped_robot's_legs_A_comprehensive_review
- Zhiying Wang, Xilun Ding, Alberto Rovetta, Alessandro Giusti, Mobility analysis of the typical gait of a radial symmetrical six-legged robot, *Mechatronics*, Volume 21, Issue 7, 2011, Pages 1133-1146, Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957415811001115>
- Čížek, Petr & Zoula, Martin & Faigl, Jan. (2021). Design, Construction, and Rough-Terrain Locomotion Control of Novel Hexapod Walking Robot With Four Degrees of Freedom Per Leg. *IEEE Access*. PP. 1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3053492. Available from: https://www.researchgate.net/publication/348671124_Design_Construction_and_Rough-Terrain_Locomotion_Control_of_Novel_Hexapod_Walking_Robot_With_Four_Degrees_of_Freedom_Per_Leg



OVERVIEW OF WALKING ROBOTS DEPENDING ON THE NUMBER OF LEGS

Abstract. This article examines the different groups of walking robots. A literature review of the types of walking robots with different numbers of end mechanisms is made, and examples with their design features and characteristics are shown. The first created walking robots are examined, and conclusions are made about their movement depending on the number of legs.

Keywords: walking robot, leg, review, mechatronics, movement

Aldin Hadzhiev, Eng

Technical University of Sofia
Faculty of Mechanical Engineering
Sofia, Bulgaria
E-mail: idnhadzhiev@gmail.com

ХИБРИДНО УПРАВЛЕНИЕ НА ПРОТЕЗА ЗА ГОРЕН КРАЙНИК

Йото Йотов

Българска Академия на науките, Институт по роботика, България

Емил Петров

Българска Академия на науките, Институт по роботика, България

Резюме. Настоящата статия представя хибридна система за управление на протеза за горен крайник, която интегрира миоелектрични сигнали и гласови команди. Системата осигурява по-добра функционалност и адаптивност в сравнение с управлението на протеза само с помощта на миоелектрични сигнали. Представена е хардуерната архитектура, разгледан е обобщеният алгоритъм на действие. Разработената система предлага подобрена надеждност спрямо съществуващите решения чрез интегрирането на модули за първична обработка на сигнали и адаптивно управление. Чрез комбинираното използване на миоелектричен и гласов контрол, протезата може да отговори на сложни моторни команди, които не могат да бъдат изпълнени само чрез един от горепосочените методи.

Ключови думи: миоелектрично управление, гласово управление, протеза за горен крайник, миоелектрични сигнали

1. Увод

Загубата на горен крайник значително влияе върху качеството на живот на индивида. Традиционните миоелектрични протези осигуряват функционалност, но често се наблюдават проблеми като ниска точност на разпознаване на жестове и ограничен контрол (Rott, 2023; Shukla, 2020; Mohd, 2017). Гласовото управление, от друга страна, осигурява алтернативен метод за контрол, но е ограничено в условия с фонов шум (Dhafer, 2023; Wells, 2021; Triwiyanto, 2023). Комбинирането на двата подхода в хибридна система може да доведе до значителни подобрения във функционалността и ефективността на управлението.

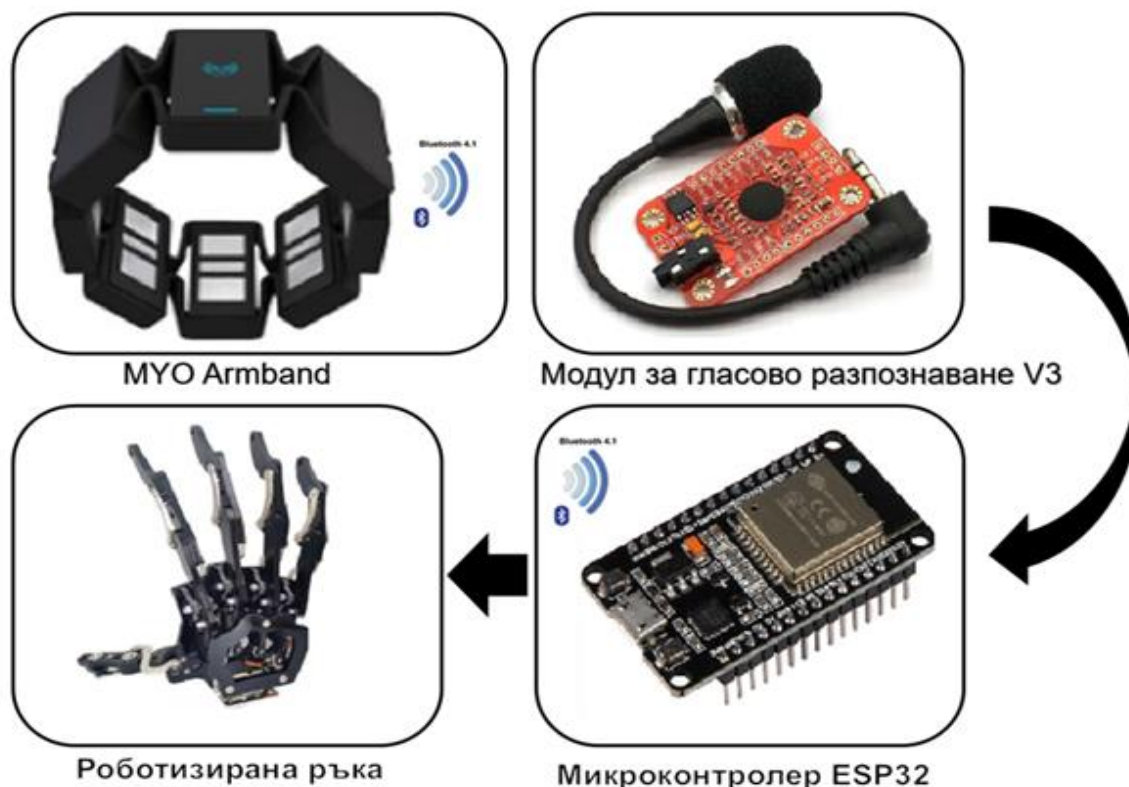
В последните години управлението на протезни устройства претърпява значителни подобрения благодарение на комбинирането на различни технологии, като миоелектрично (EMG- Electromyography) и гласово управление (Shukla, 2020; Mohd, 2017; Shabbir, 2025). Развитието на изкуствените крайници се фокусира върху подобряване на тяхната функционалност, интуитивност и удобство за потребителите, като целта е да се постигне максимално естествен контрол и интеграция с нервно-мускулната система на човека.

Тази технология е особено полезна при пациенти с целева мускулна реинервация (TMR - Targeted Muscle Reinnervation), при които има неврологични усложнения, затрудняващи традиционното миоелектрично управление, които компрометират контрола на мускулните сигнали. В такива случаи гласовото управление предоставя важна алтернатива.

2. Хибридна система за контрол на протеза за горен крайник

Предложената система за хибридно управление на роботизирана ръка – протеза чрез EMG сигнали и гласови команди е изградена от четири основни компонента.

Устройството за снемане на EMG сигнали (MYO Armband; Thalmic Labs, no date) и гласовия модул (Voice Recognition V3; Elechouse, no date), изпращат данни съответно чрез Bluetooth и UART комуникация към микроконтролер ESP32 (Espressif Systems, no date), който ги преобразува в движение на роботизирана ръка с 5 степени на свобода. Основните компоненти на хибридно управление са представени на Фиг. 1.

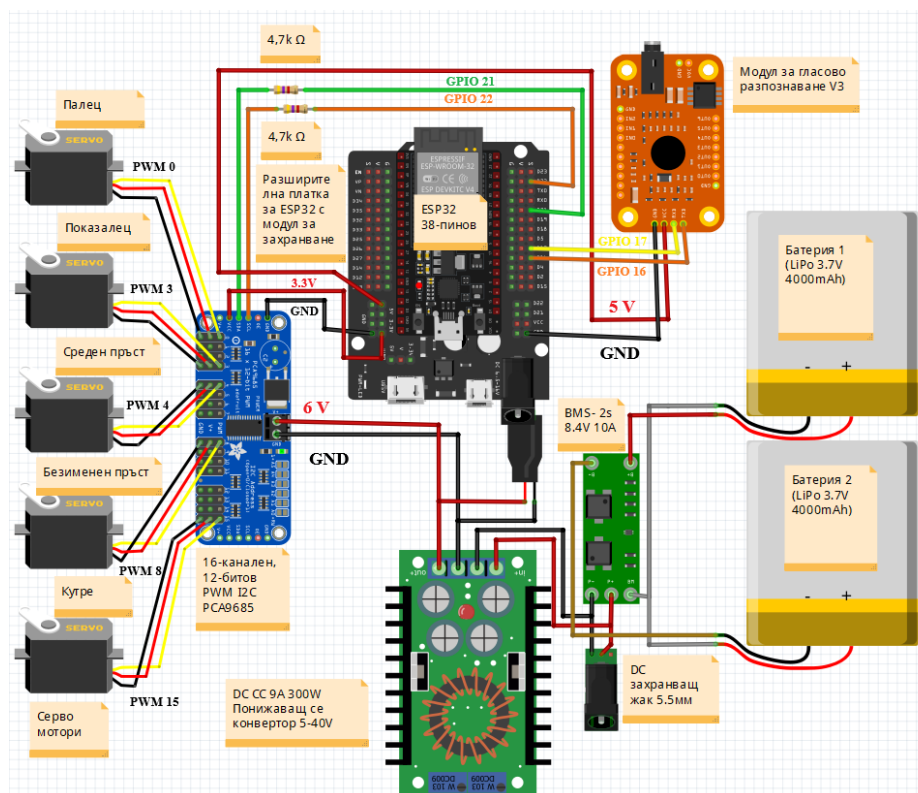


Фиг. 1. Обща структура на хибридно управление

За да осигури функционално и гъвкаво управление, хибридният контролер на протеза за ръка съчетава два ключови метода – миелектричен и гласов. EMG гривната детектира електрическите сигнали от съкращения на мускулите на предмишницата, които се генерират при опит за движение. Тези сигнали предоставят директна информация за намеренията на потребителя. От своя страна модулът за разпознаване на гласови команди позволява на потребителя да издава конкретни инструкции, като "хвани", "отвори", „заклучване на движенията“, „отключване на движенията“ както и различни комбинации на позицията на пръстите. Тези два потока от данни се обединяват и обработват от микроконтролер ESP32, който служи като централен координатор. Микроконтролерът интерпретира EMG сигналите и гласовите команди, като ги преобразува в прецизни сигнали за управление на роботизираната ръка с 5 степени на свобода.

2.1. Хардуерна архитектура

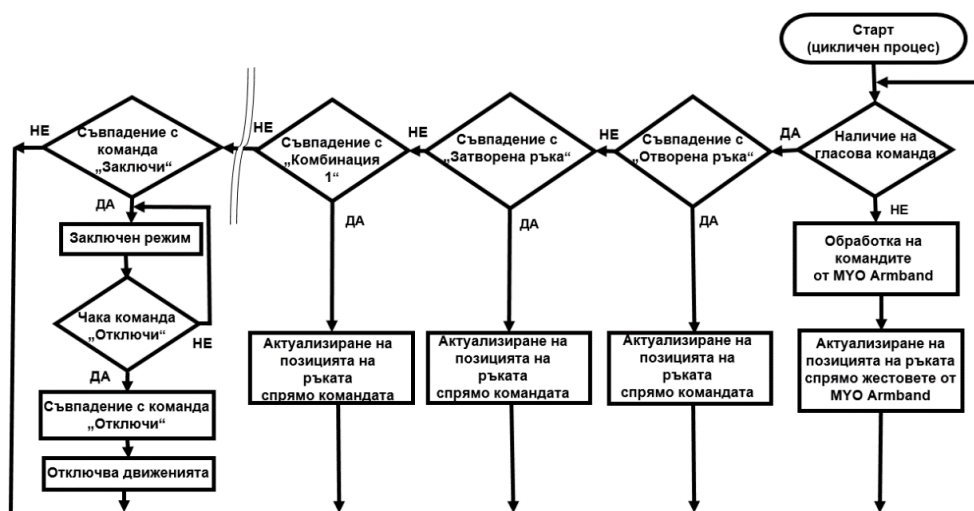
На Фиг. 2 е представена електронната схема на управление, включваща основните компоненти и връзки между тях.



Фиг. 2. Електронна система за управление

Електронната система за управление на протезата се захранва от две батерии, които минават през защита и понижаващ модул, осигуряващи правилното напрежение за всяка част. В центъра е микроконтролерът ESP32, който получава гласови команди чрез модул за разпознаване на реч и EMG сигнали от миоелектричната гривна. ESP32 обработва командите и изпраща сигнали към модул за широчинно-импулсна модулация, който контролира движението на пет серво мотора – по един за всеки пръст на ръката.

2.2. Софтуерна архитектура



Фиг. 3. Блок-схема на алгоритъма на управление

Блок-схемата от Фиг. 3 представя взаимодействието между гласовото управление и EMG контрола чрез сигнали от Myo Armband.

Програмата работи циклично. В началото се проверява дали има подадена гласова команда. Ако няма такава, се преминава към проверка на жестовете от ръката чрез устройството MYO Armband и се актуализира позицията на ръката, след което проверката започва отначало.

Ако има подадена гласова команда, се проверява дали тя съвпада с някоя от предварително зададените команди. Ако е получена стандартна команда за конкретна позиция („Отворена ръка“ ... „Комбинация 1“ ... и т.н.), позицията на ръката се актуализира и проверката започва отначало. Ако командата е „Заклучи“, системата заключва движенията и влиза в специален режим, в който чака единствено гласова команда „Отключи“. Когато тя бъде подадена, движението се отключва и процесът започва отначало.

Управлението чрез EMG сигнали е с по – нисък приоритет от този на гласовите команди.

Алгоритъмът се изпълнява непрекъснато, докато захранването не бъде изключено.

3. Експериментални резултати

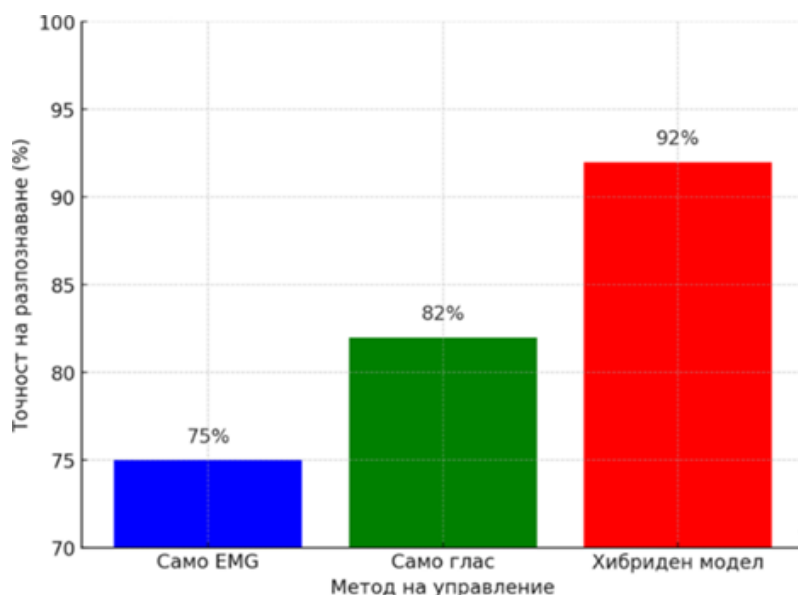
За да бъде определена точността на отделните модалности същите бяха тествани поотделно и бе направена оценка за ефективността им. Подходът следва методология, подобна на тази, описана в изследването на (Mohd, 2017), но тъй като в това изследване се използва различен модул за гласово командване и приложението за хибридно управление е различно, се налага да се осъществят нови изследвания, с които да се определи ефективността на предложеното управление.

Списък на гласовите команди е показан на Фиг. 4, а експерименталните резултати са показани на Фиг. 5.



Фиг. 4. Илюстрация на режимите на гласово командване (Wells and Akers, 2021)

Данните са събрани чрез 10 експеримента със здрави доброволци, като при всеки експеримент са извършени 100 жеста, след което са изчислени средните проценти, показани на Фиг. 5 (Mohd, 2017).



Фиг. 5. Точност на разпознаване на командите

4. Обсъждане

На Фиг. 6 е представена експерименталната постановка.

Анализът на получените експериментални резултати потвърждава предимствата на хибридният подход за управление на протеза за горен крайник. При отделно използване на миоелектричната гривна MYO Armband се наблюдават типични ограничения, свързани с нестабилността на електромиографските сигнали, която зависи от анатомичните особености на потребителя, позиционирането на сензорите и външни фактори като влага, електрически смущения и др. Освен това, линейното разположение на сензорите не осигурява пълно покритие на предмишничните мускули, което води до неточности при разпознаване на сложни движения.

От друга страна, гласовият модул показва висока чувствителност към околния шум, както и зависимост от индивидуалните характеристики на гласа на потребителя. Необходимостта от предварително обучение на командите и ограниченият речник на вградения софтуер също представляват бариери пред широкото приложение на този метод в реална среда.

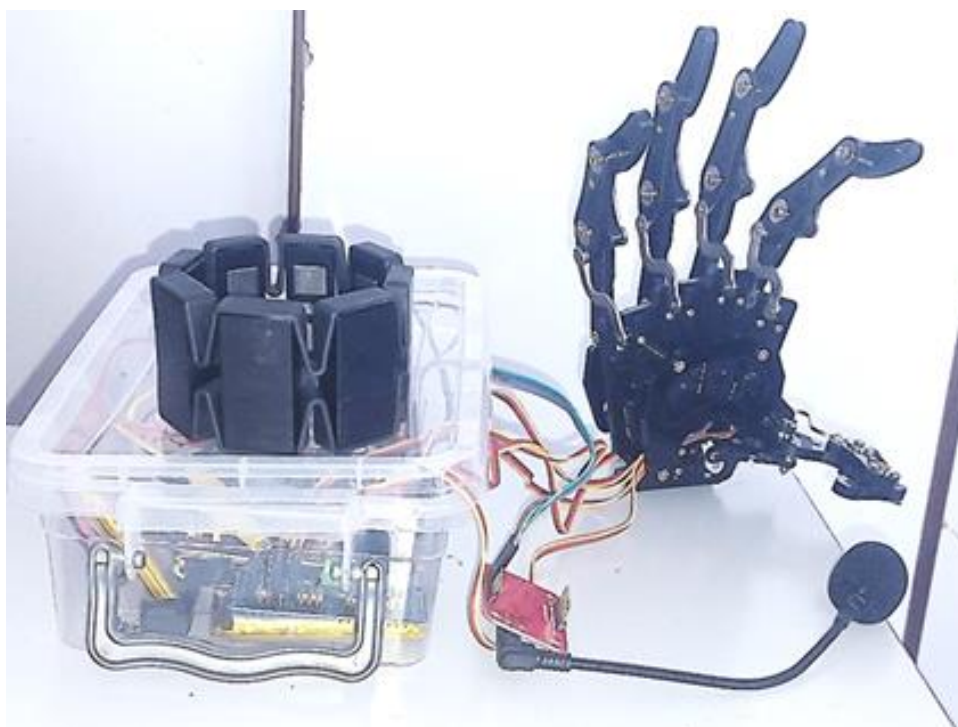
Въпреки тези недостатъци, комбинирането на двата метода в хибриден модел значително подобрява ефективността. Резултатите показват, че при използване само на EMG контрол точността на разпознаване е 75%, а при гласово управление – 82%. Когато двете модалности се използват заедно, точността достига 92%. Това се дължи на допълващия характер на двата вида контрол – когато единият не функционира оптимално, другият може да компенсира. Така се повишава общата надеждност на системата.

Този ефект се обяснява чрез принципа на мултимодално сливане на сигнали, при който информацията от различни източници се комбинира за по-прецизно вземане на решения. Например, ако EMG сигналите не са достатъчно отчетливи, гласовата команда може да потвърди намерението на пациента. Обратно, ако гласовата команда не бъде правилно разпозната, EMG контролът може да осигури нужната реакция.

Освен това, системата може да бъде конфигурирана така, че EMG контролът да отговаря за динамични движения, докато гласовите команди служат за активиране на определени режими – като заключване, отключване или зададени позиционни комбинации. Това прави взаимодействието по-гъвкаво и по-интуитивно.

Особено ценно е приложението на гласовото управление при пациенти с ограничена мускулна активност, например при случаи на целева мускулна реинервация или двустранна ампутация, където традиционният EMG контрол е затруднен или невъзможен.

Сравнението с предходни изследвания (Mohd, 2017; Shabbir, 2025) показва, че предложената система е надградена по отношение на модулната архитектура, хардуерната простота и приложимостта при реални условия. Експериментите върху здрави доброволци демонстрират надеждност на системата и нейната адекватна реакция при стандартни движения и команди. За цялостна оценка са необходими тестове върху пациенти с ампутации, както в контролирана, така и в реална среда.



Фиг. 6. Експериментална постановка

5. Заключение

От дискусията на получените резултати на представената хибридна система за управление на протеза за горен крайник интегрираща миелектрични сигнали и гласови команди, могат да се направят следните изводи:

- Комбинираният подход подобрява точността на разпознаване и надеждността на управлението в сравнение с използването само на EMG или само на гласов контрол;
- Системата предлага по-висока гъвкавост, като позволява изпълнение на по-сложни команди чрез комбинация от сигнали;

- Гласовото командване предоставя възможност за независим контрол при пациенти с ограничена мускулна активност или в случаи на двустранна ампутация, където механичните бутони не са опция;
- Хардуерната и софтуерната архитектура позволяват бъдещо надграждане на системата и интеграция с други биосензори и адаптивни алгоритми за обучение;

Предстоящи изследвания ще се фокусират върху:

- Повишаване на устойчивостта на системата спрямо шум и смущения;
- Разширяване на речниковите възможности чрез внедряване на по-усъвършенствани модели за гласово разпознаване;
- Провеждане на клинични изпитвания с реални пациенти, за да се оцени дългосрочната ефективност, удобство и приемане на системата;
- Изследване възможността за механично надграждане и допълнителен контрол чрез въвеждане на нови движения, заместващи проблемна или липсваща гивнена става.

REFERENCES

- Dhafer, A., Ahmed, Y. (2023). Control robotic hand depending on voice commands and IoT. *Nano Biomedicine and Engineering*, 15 (August) [online]. (Accessed: 27 March 2025). Available at: <https://doi.org/10.26599/NBE.2023.9290028>
- Elechouse (no date). Voice Recognition Module V3 - Manual [pdf]. (Accessed: 27 March 2025). Available at: https://www.elechouse.com/elechouse/images/product/VR3/VR3_manual.pdf
- Espressif Systems (no date). ESP32 Technical Reference Manual [pdf]. (Accessed: 27 March 2025). Available at: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf
- Mohd, T.K., Carvalho, J., Javaid, A. (2017). Multi-modal data fusion of voice and EMG data for robotic control. *Proceedings of IEEE* [online]. (Accessed: 27 March 2025). Available at: <https://doi.org/10.1109/XXX.2017.1104>
- Rott, B.P. (2023). Development of an electromyography sensor wristband for controlling a prosthetic hand in virtual reality. In: *Proceedings of the 3rd MCI Medical-, Health- and Sports Engineering Master's Conference*, Innsbruck, September 2023.
- Shabbir, F., Iqbal, M., Asghar, A., Khan, S., Khan, S. J. (2025). Development of six-degree-of-freedom prosthetic hand with integrated voice and electromyography control using machine learning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 142, 109949 [online]. (Accessed: 27 March 2025). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109949>
- Shukla, P., Mariyanayagam, D. (2020). Smart, secure and sustainable robotic hand. *London: Department of Communications Technology and Mathematics*, London Metropolitan University.
- Thalnic Labs (no date). Thalnic Labs Myo User Manual [pdf]. (Accessed: 27 March 2025). Available at: <https://www.manualslib.com/manual/1267879/Thalnic-Labs-Myo.html>

- Triwiyanto, T., Luthfiah, S., Pawana, I.P.A. (2023). Bilateral mode exoskeleton for hand rehabilitation. *HardwareX*, e00432 [online]. (Accessed: 27 March 2025). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00432>
- Wells, L., Akers, J. (2021). Voice-activated bionic hand. In: *Cedarville University Research Symposium* [online]. (Accessed: 26 March 2025). Available at: https://digitalcommons.cedarville.edu/rs_symposium/2021/poster_presentations/16

UPPER LIMB PROSTHESIS HYBRID CONTROLLER

Abstract. The article presents a hybrid control system for an upper limb prosthesis that integrates myoelectric signals and voice commands. The system provides better functionality and adaptability compared to controlling a prosthesis using only myoelectric signals. The hardware architecture is presented, the generalized algorithm of action is discussed. Compared to existing solutions the developed system offers improved reliability by integrating modules for primary signal processing and adaptive control. Through the combined use of myoelectric and voice control, the prosthesis can respond to complex motor commands that cannot be executed using only one of the above mentioned methods.

Keywords: myoelectric control, voice control, upper limb prosthesis, EMG signals

Assist. Yoto Yotov, Eng

ORCID iD: 0009-0004-0567-0967

Web of Science Researcher ID: MTD-2001-2025

Bulgarian Academy of Sciences, Institute of Robotics
Sofia, Bulgaria

E-mail: jottov@abv.bg

Assoc. Prof. Emil Petrov, PhD

ORCID iD: 0009-0005-1450-0422

Web of Science Researcher ID: MTD-2694-2025

Bulgarian Academy of Sciences, Institute of Robotics
Sofia, Bulgaria

E-mail: epetroff@abv.bg



MAIN CHALLENGES FOR INTEGRATION OF INDUSTRY 5.0 PRINCIPLES IN EXISTING SYSTEMS FOR AUTOMATION AND CONTROL OF INDUSTRIAL AND MANUFACTURING PROCESSES

Dimitar Totev

Technical University of Sofia, Bulgaria

Abstract. In the last decade the concept Industry 4.0 was set as a main frame for automation and digitalization and had a huge impact on the optimization of manufacturing and industrial processes. Nowadays, as a native successor, Industry 5.0 upgrades this concept with a new set of principles, ideas and technologies. The aim of this work is to define the main challenges for integration of Industry 5.0 principles in existing systems for automation and control and to propose strategies for their resolution.

Keywords: control systems, digitalization, industry 5.0, sustainability, industrial processes, manufacturing

1. Introduction

In the modern world most of the industrial and manufacturing processes are automated. Most of the automation is based on classic control systems which rely on PLC (Programmable Logic Controller), SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) and DCS (Distributed Control System) technology. With the introduction of the internet and the fast development of high technologies such as IoT (Internet of Things), AI (Artificial Intelligence), Big Data, AR/VR (Augmented and Virtual Reality), etc. at the beginning of the new century, the question for digitalization and modernization of the existing control systems has become more and more actual. In 2011, the German government introduced for the first time the concept “Industry 4.0” as a framework for digitalization and automation of industrial and manufacturing processes using newly developed high technologies and CPS (Cyber-Physical Systems) as a base for optimization of the efficiency and the competitiveness of the German industry against its competitors worldwide. Based on its universal approach, in the last decade the concept “Industry 4.0” became unofficial world standard and a model for modernization and optimization of industrial and manufacturing processes. The world COVID-19 pandemic (2019 – 2023) faced the world with a new reality, which heavily affected the global production and supply chains. All this revealed some of the weak points of the concept “Industry 4.0” and created the need of a new updated strategy for organization of the manufacturing and industrial processes. Following these needs, in 2021, the European Commission introduced the new concept “Industry 5.0” which is a native successor of the concept “Industry 4.0” and sets a solid benchmark for improvements and upgrade of the existing concept and its principles toward the new global reality and challenges in the manufacturing and industrial processes (Rijwani, 2025).

2. Main principles of the concept Industry 5.0

As its predecessor, the concept “Industry 5.0” relies on the automation and digitalization in order to improve the efficiency and the competitiveness of industrial and manufacturing processes but at the same time puts the main focus on the human role in these processes and human collaboration with the high technologies,

sustainability, green technologies and resilience. The main principles of the concept “Industry 5.0” are shown on figure 1.

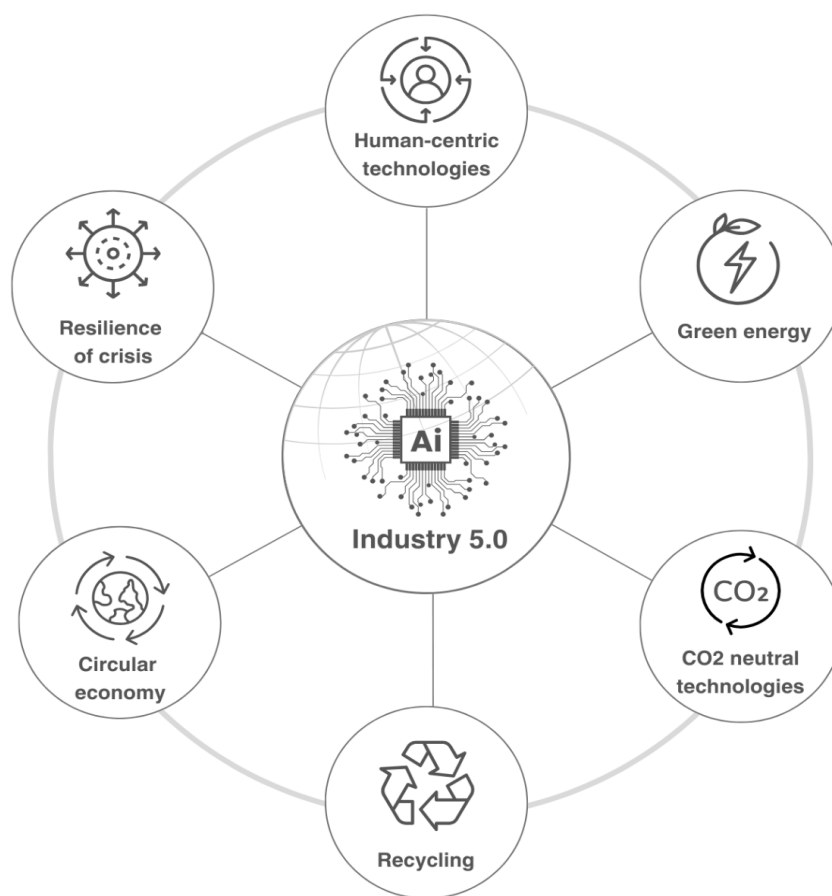


Fig. 1. Main principles of the concept “Industry 5.0”

- Human-centric technologies

These technologies ensure that people and their knowledge stay important part of the industrial and manufacturing processes and are not replaced by high technologies. The main aim of the concept “Industry 5.0” is that technologies should serve the people and not replace them. Such technologies are Collaborative Robots, Augmented and Virtual Reality (AV/VR), Brain Computer Interfaces (BCI), Exoskeletons, etc. All these have to ensure that AI driven digitalization respects human values and rights and provides a transparent decision-making process while collaborating people and AI. (Kambushev, 2019; Dichev, 2022; Dichev, 2024)

- Green energy

One of the main aspects of the concept “Industry 5.0” is the usage of sustainable and renewable sources of energy. All this leads to integration of energy sources such as solar, wind, hydro and minimization of the usage of fossil fuels.

- CO₂ neutral technologies

Since one of the main targets of the concept “Industry 5.0” is the sustainability, the minimization of the CO₂ footprint of the manufacturing and the industrial processes is one of the most important topics. Therefore, technologies for capturing, utilizing and storage of carbon dioxide play an important role in this concept.

- Recycling

Recycling and waste management is important in concept “Industry 5.0” for optimization and increase of raw materials usage efficiency, optimization of the cost of the final product and the general environmental footprint of the industrial and manufacturing processes.

- Circular economy

The main aim of the circular economy, as one of the main principles of the concept “Industry 5.0”, is to create a sustainable economic model where manufacturing and industrial processes are based on the resource efficiency and the 3R strategy – reuse, remanufacturing and repair. It puts an accent of the closed loop processes with high integration and utilization of resources and materials from one process and industry to another. (Dimitrov, 2019; Nikolov, 2019)

- Resilience of crisis

The main focus of this aspect is that the industrial and manufacturing processes are organized in such way, so that they are protected and able to predict, adapt and recover from unexpected situations such as economic crisis, supply chain failures and unavailability, pandemics, natural disasters, cyber-attacks and any other force major situations.

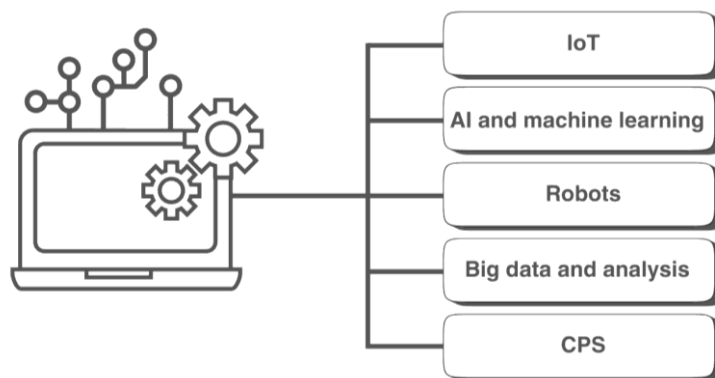


Fig. 2. Main set of technologies of the concept “Industry 5.0”

Despite of the changed focus, the concept “Industry 5.0” keeps the same set of key technologies as the concept “Industry 4.0” but their usage has a different value. The main set of technologies is shown on figure 2.

- IoT (Internet of Things)

One of the main technologies and the backbone of the cyber-physical systems. It is a network that connects devices, sensors, machines, systems, etc. in order to exchange data with equal rights and has a flat model of communication architecture. In most cases communications are based on low energy transmission protocols.

- AI (Artificial Intelligence) and machine learning

This is an important technology that plays a significant role in autonomous decision making based on processing of a large amount of data, recognition of patterns and predictions.

- Robots

Robots are special machinery that can be programed to perform different movements and tasks autonomously and are largely used in the industrial and manufacturing processes for replacement of human labor. (Dimitrova, 2025; Malakov, 2023; Tsolov, 2024)

- Big data and analysis

Big data is normally a large volume of structured or non-structured data. Analysis of such data volumes is one of the bases for recognition of data models and autonomous decisions.

- CPS (Cyber-Physical System)

A cyber-physical system is any set of processes, devices, algorithms and systems that work together to ensure industrial or manufacturing processes.

The differences in using the main set of technologies in the concept “Industry 4.0” and the concept “industry 5.0” are shown in table I.

Table I. Main set of technologies and their usage in the concept “Industry 4.0” and concept “Industry 5.0”

Technology	Industry 4.0	Industry 5.0
IoT	Important technology that allows integration and data exchange between different devices and layers of the system	Important technology that allows integration and data exchange between different devices and layers of the system including also people as an integral part of this eco system
AI and machine learning	Important technology for autonomous decision making	Important technology used as decision support
Robots	Replace the human labor whenever this is possible	Work together with people and not replacing them
Big data and analysis	Important technology for autonomous decision making	Important technology used as decision support
CPS	Main concept for creating an autonomous automation system without or with minimal human interaction	Integration of people as an important part of the cyber-physical systems

As it can be seen from the table, the concept “Industry 4.0” relies on technologies as a main alternative of the human labor and knowledge, while concept “Industry 5.0” is trying to integrate the people as integral and important part of the industrial and manufacturing processes.

3. Main challenges for integration of Industry 5.0 principles in existing systems for automation and control of industrial and manufacturing processes

The main challenges for integration of existing systems for automation and control with the principles of Industry 5.0 are as follow:

- Old communication and system infrastructure that cannot be upgraded to the new communication standards and technologies

In some of the existing systems the communication and system infrastructure are outdated and due to some specifics cannot be upgraded. In old systems communication is based on some closed internal protocols that cannot be integrated into the new communication standards. This makes practically impossible the integration of new high technologies and exchange of information between the different layers of the system.

- Incompatibility of the existing hardware and devices with the new technologies and no possibility of upgrading and change

Some of the systems are based on hardware with an expired life cycle that cannot be upgraded or replaced with a new model. This makes the extension of the system impossible and does not allow the integration of new hardware and devices.

- Incompatibility of the existing system and application software with the new technologies and no possibility of upgrading and change

In most of the cases in the existing systems, the software is custom made based on specific engineering environment which makes the reconfiguration and adding of new functionalities an impossible task.

- Low level of integration between the different system components and hierarchy levels

In the past systems were organized in a vertical hierarchy model which makes the integration of different components and levels very low and the exchange of information between them very limited. This is contraversive to the requirements of the concept “Industry 5.0” where data exchange and communication is one of the main focuses.

- Low energy efficiency of the devices and components

Some of the old equipment and devices have high-power consumption which makes the existing system inefficient in terms of energy consumption. This seriously affects the carbon footprint of the industrial and manufacturing processes and their whole environmental footprint which violates one of the main principles.

- Incompatibility of the existing manufacturing and industrial processes with the principles of the concept “Industry 5.0”

Not all the industrial and manufacturing processes can apply with the principles of the concept “Industry 5.0”. For example, processes with strategic or military purposes have totally different priorities and normally they don’t need to comply with any environmental and resource efficiency requirements. Even more, due to security purposes, they cannot exchange data or be accessible from third-party systems and environments.

4. Main directions for integration of Industry 5.0 principles in existing systems for automation and control of industrial and manufacturing processes

Following the main challenges for integration of existing systems for automation and control with the principles of Industry 5.0, the main directions are as follow:

- Upgrade of the existing system and communication infrastructure

One of the most important steps for integration is the upgrade of the system and communication infrastructure. This will give a possibility for easy integration of new devices and ensure the data exchange between the different layers of the system. The upgraded infrastructure should be based on open architecture and modern communication protocol and standards, and should support further extensions and upgrades, as well as integration with other systems and third-party devices and environments.

- Upgrade of the existing hardware

The upgrade of the existing hardware is important for the implementation of new technologies, software and devices. The main aim is that the upgraded hardware should support easy integration, communication and data exchange with other devices, The hardware configuration should be open as much as possible and allow future upgrades and extensions.

- Upgrade of the existing software

Since most of the high technologies related to the concept “Industry 5.0” are based on software backend and modern algorithms, upgrade of the existing software is one of the most important steps. The new software environment should be open and structured in such a way, so that a new functionality could be easily added and implemented. It must support all actual software development standards, principles and frameworks. Since cybersecurity is an important topic nowadays, it should comply with all relevant standards and procedures.

- Implementation of new technologies

The implementation of new high technologies is crucial for the systems in order to comply with the principles of the concept “Industry 5.0”.

As one of the main principles is human-centric industrial and manufacturing processes, it is important to ensure that people are equal part of the cyber-physical systems. In order to achieve such deep integration, technologies like AR/AV (Augmented and Virtual Reality) and BCI (Brain Computer Interfaces) must be implemented. One of the important aspects here is the ethics while using AI (Artificial Intelligence) for decision support

Another important aspect is environmental protection. There are a lot of technologies that could apply, but the most important of them are those related to integration of renewable energy sources, energy monitoring and energy efficiency management, as well as waste management, recycling and resource management efficiency.

Resilience of crisis is another important principle of the concept “Industry 5.0”. Here most of the technologies that can be implemented have a strong AI background and are based on big data and analytics. An important aspect here is also the cyber security, which is one of the main concerns in the modern systems.

5. Conclusions

The concept “Industry 5.0” is a native successor of the concept “Industry 4.0” which main aim is to provide an upgraded framework of measures, principles and technologies for modernization and improvement of the industrial and manufacturing processes.

Even though both concepts share the same goal and set of high technologies, they have a different focus. While concept “Industry 4.0” is focused mainly on the optimization and efficiency, the concept “Industry 5.0” is focused on the human-centric approach, environmental sustainability and resilience of the industrial and manufacturing processes.

There are many challenges for the integration of the existing control systems with the principles of the concept “Industry 5.0” but main of them are related to the incompatibility of the existing hardware and software environment with the new technologies and standards.

A set of basic directions for integration of the existing control systems with the principles of the concept “Industry 5.0” has been defined, which gives the most important steps of measures that have to be considered in order to enable these systems for implementation of the needed technologies and further modernization and integration.

REFERENCES

- Dimitrov, S., Dimitrov, L., Dimitrova, R., Nikolov, S. (2019). Examination of the process of automated closure of containers with screw caps, *Recent Research in Control Engineering and Decision Making, Book Series, Springer Nature Switzerland AG*, Volume 199, pp. 502-514, https://doi.org/10.1007/978-3-030-12072-6_41
- Dimitrova, R., Nikolov, S., Tsolov, S., Dimitrov, S. (2025). Methodology for designing low-cost robots with parallel kinematics, *IOP Publishing Ltd, Open Access, Eng. Res. Express*, 7 (2025) 015214, <http://dx.doi.org/10.1088/2631-8695/ada5a8>
- Dichev, D., Diakov, D., Zhelezarov, I., Valkov, S., Ormanova, M., Dicheva, R., Kupriyanov, O. (2024). A method for correction of dynamic errors when measuring flat surfaces, *Journal Sensors Open Access*, Vol. 24, issue 16, <https://doi.org/10.3390/s24165154>
- Dichev, D., Diakov, D., Dicheva, R. (2022). Method for increasing the accuracy of linear measurements based on a measurement-computational approach. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2505, Code 120008, <https://doi.org/10.1063/5.0101084>
- Kambushev, M., Bilyderov, S., Dimitrova, R., Nikolov, S. (2019). Optimizing the selection of the weighting matrices Q and R in LQR, *International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech) 2019 Conference Proceedings*, <https://doi.org/10.1109/HiTech48507.2019.9128263>
- Malakov, I., Zaharinov, V., Nikolov, S., Dimitrova, R. (2023). Computer-aided choosing of an optimal structural variant of a robot for extracting castings from die casting machines, *Journal Actuators, Open Access*, Volume 12, Issue 9 (September 2023), Article number 363, <https://doi.org/10.3390/act12090363>
- Nikolov, S., Dimitrova, R., Topov, I. (2019). New approach at mechanical engraving of details with large sizes, *International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech) 2019 Conference Proceedings*, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9128261>
- Rijwani, T., Kumari, S., Srinivas, R. & others (2025). Industry 5.0: a review of emerging trends and transformative technologies in the next industrial revolution. *International Journal of Interactive Design and Manufacturing*, 19, pp.667–679, <https://doi.org/10.1007/s12008-024-01943-7>
- Tsolov, S., Dimitrova, R., Nikolov, S. (2024). Problems in designing robots with parallel kinematics, *Engineering Proceedings an Open Access Journal by MDPI*, Vol. 70 (1):5. <https://doi.org/10.3390/engproc2024070005>

Ch. Assist. Prof. Dimitar Totev, PhD

ORCID iD: 0009-0002-1863-0273

Web of Science Researcher ID: MSZ-8114-2025

Technical University of Sofia

Sofia, Bulgaria

E-mail: dkdt@tu-sofia.bg

MODERNIZATION THE CONTROLLING OF AUTOMATED MECHATRONIC SYSTEM FOR CUTTING ECO-BRIQUETTES

Slav Dimitrov

Technical University of Sofia, Bulgaria

Abstract. The purpose of the present work is to carry out the modernization of an automated control of a mechatronic system for cutting eco-briquettes. The system is equipped with an electric circular saw to perform cutting of eco-briquettes with one size and uniform density. The modernization aims to provide the functionality to cut ecobriquettes of different widths and different moisture contents. For this purpose, it is necessary to carry out the regulation of a circular knife with different speeds according to the thickness and moisture content of the incoming eco-briquettes.

Keywords: automation, mechatronic system, programming, regulation, eco-briquette

1. Introduction

The modernization and automation of existing machines and devices for specific technological processes is a great challenge for mechanical engineers (Malakov, 2023; Dimitrova, 2020; Vladimirov, 2024). Analysis of preliminary information and task parameters is of particular importance when designing (Dimitrova, 2019; Kambushev, 2020) and implementing a new control system (Biliderov, 2019; Calovska, 2024). It is necessary to take into account all requirements specific to a given technology before approaching its automation and modernization (Tomov, 2017; Totev, 2022).

This development will be aimed at presenting a modernization of a mechatronic system for eco-briquette cutting. The main indicators for the purpose of the upgraded system are the thickness of the eco-briquettes and the presence of moisture content in the pressed material. According to their shape, eco-briquettes are cylindrical and rectangular, and in this paper, upgraded control for cylindrical ecobriquettes is designed. The examined dimensions of cylindrical ecobriquettes are shown in Table I.

Table I examined dimensions of cylindrical ecobriquettes

N	Diameter [mm]	Length [mm]
1	60	100
2	70	150
3	80	200
4	90	250
5	100	300

Ecobriquettes have different moisture contents, depending on the incoming raw material, which is a major factor in their combustion. The moisture content of ecobriquettes is usually between 5% and 10%, which is significantly lower than natural wood, which can have a moisture content of 30% to 50%. Lower moisture in the finished product has many advantages:

- Higher combustion efficiency - give more heat per kg.
- Less smoke and soot - a cleaner burn that keeps the chimney and stove clean.
- Less ash - less waste after combustion.

The automated mechatronic eco-briquette cutting system takes into account the different briquette diameter and moisture content. The system aims to make the optimum cut of the briquette without distorting its shape or reaching blackening or ignition.

2. Operating principle of the system

The mechanical construction of the mechatronic system for cutting off eco-briquettes includes:

- A support frame, with guide rails mounted thereon for the movement of tanks clamped to a mobile sled.
- A mobile platform driven by a lifting pneumatic cylinder.
- A pressurized pneumatic cylinder serving to hold the material.
- An electric motor connected by a belt drive to the shaft of a cutting disc.
- Pneumatic cylinder control modules.
- Electrical control panel for process operation.
- Electric weighing scale for measuring the product.
- Position and moisture content sensors.

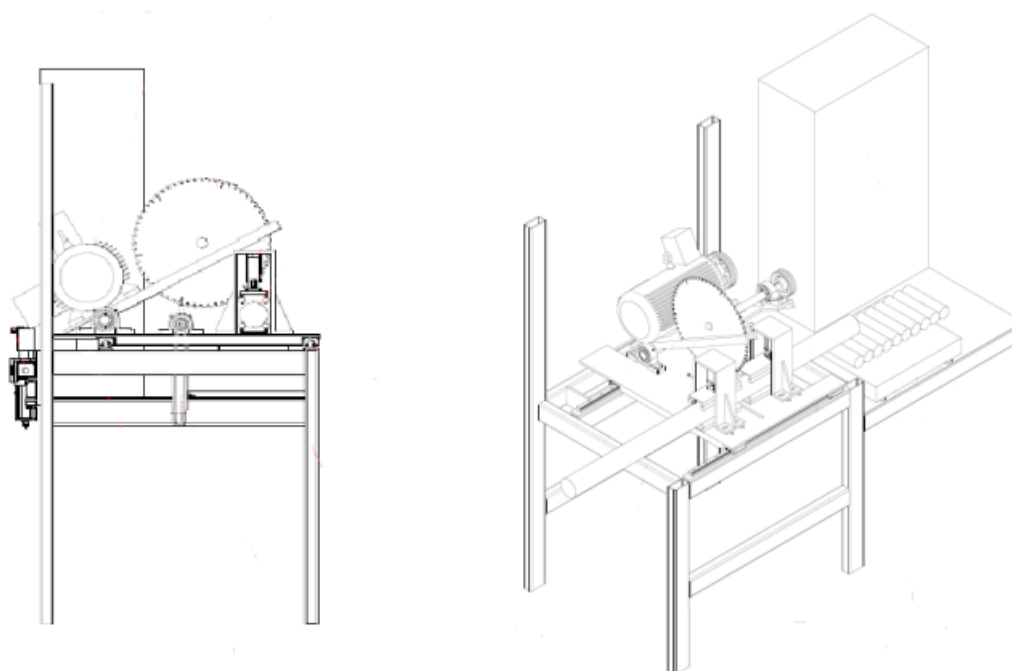


Fig. 1. Diagram of mechatronic system for cutting eco-briquettes

The upgraded mechatronic system has the following working principle:

- The primary raw material is placed in a storage silo and the moisture sensor sends the moisture content to the programmable logic controller. The raw material needs to be agitated to balance the moisture content.
- The automated mechatronic briquette system presses the primary raw material and converts it into an eco-briquette.
- From the feed nozzle, the thickness of the briquette produced is determined with reference to Table I.
- The briquette is moved along a chute conveyor to the cutting area.



- The length of the manufactured product is set by a touch panel (HMI) and measured with an incremental encoder.
- After reaching the desired length, the upgraded system starts the circular saw blade to the lower position.
- The speed of the cut is determined by the presence of moisture and the thickness of the eco-briquette.
- After reaching the lower position sensor, the circular knife returns to the upper position and the eco-briquette is removed from the working area with a step conveyor.
- The prepared product is passed to a weighing scale and it is determined whether it is the proper weight.
- In case of abnormal weight, the product is examined for distortion by the circular knife.

The speed of the circular knife is determined by the basic parameters diameter and moisture, assuming that the linear feed rate of the actuator is the same for all sizes of eco-briquettes. The maximum speed of the electric motor is 1500 [RPM]. The speed calculation is presented in the following formula:

$$EK - \text{RPM} = F_{ek} \cdot V_{ek} \cdot K_{ek} \quad (1)$$

Wherever:

EK-RPM – Calculated circular saw blade speed.

F_{ek} – Diameter of eco-briquette.

V_{ek} – Moisture content of circular blade.

K_{ek} – Amplification coefficient.

Example with a maximum moisture content of 10 [%] and a maximum diameter 100 [mm]:

$$EK - \text{RPM} = 100 * 0,1 * 150 = 1500 [\text{rpm}]$$

Example with a moisture content of 7 [%] and a diameter of 80 [mm]:

$$EK - \text{RPM} = 80 * 0,07 * 150 = 840 [\text{rpm}]$$

Example with a moisture content of 5 [%] and a diameter of 60 [mm]:

$$EK - \text{RPM} = 60 * 0,05 * 150 = 450 [\text{rpm}]$$

The main movements in the automated mechatronic system are carried out by pneumatic cylinders and a frequency-controlled electric motor. A frequency controller with current monitoring [A] has been integrated to the system modernization, enabling to track the load of the electric motor against the different moisture content of the eco-briquettes. The selected circular saw blade electric motor is characterized by low power consumption and high efficiency.

System modernization is a major goal of the upcoming development and in order to carry out a complete process, a programmable logic controller has been added to the mechatronic system. The controller is needed both to control the basic processes and to monitor the actuators from the inserted sensor. The execution of the automatic cycle is also performed by the high process controller, the main indicator being the current rise in the frequency regulator for the different types of eco-briquettes.

An "HMI" visualization and control system is integrated to the upgraded system. The developed visualization is used to select basic operating modes, set different sizes of eco-briquettes and set time cycles. The visualization also shows the variation of current [A] with respect to different moisture content in the system. Electrical documentation for the connection of the main components has been developed for the upgraded system. The electrical documentation has been developed according to the norms and complies with the main safety standards (Fig. 2) all types of sensors and instrumentation implemented in the system are provided in the documentation.

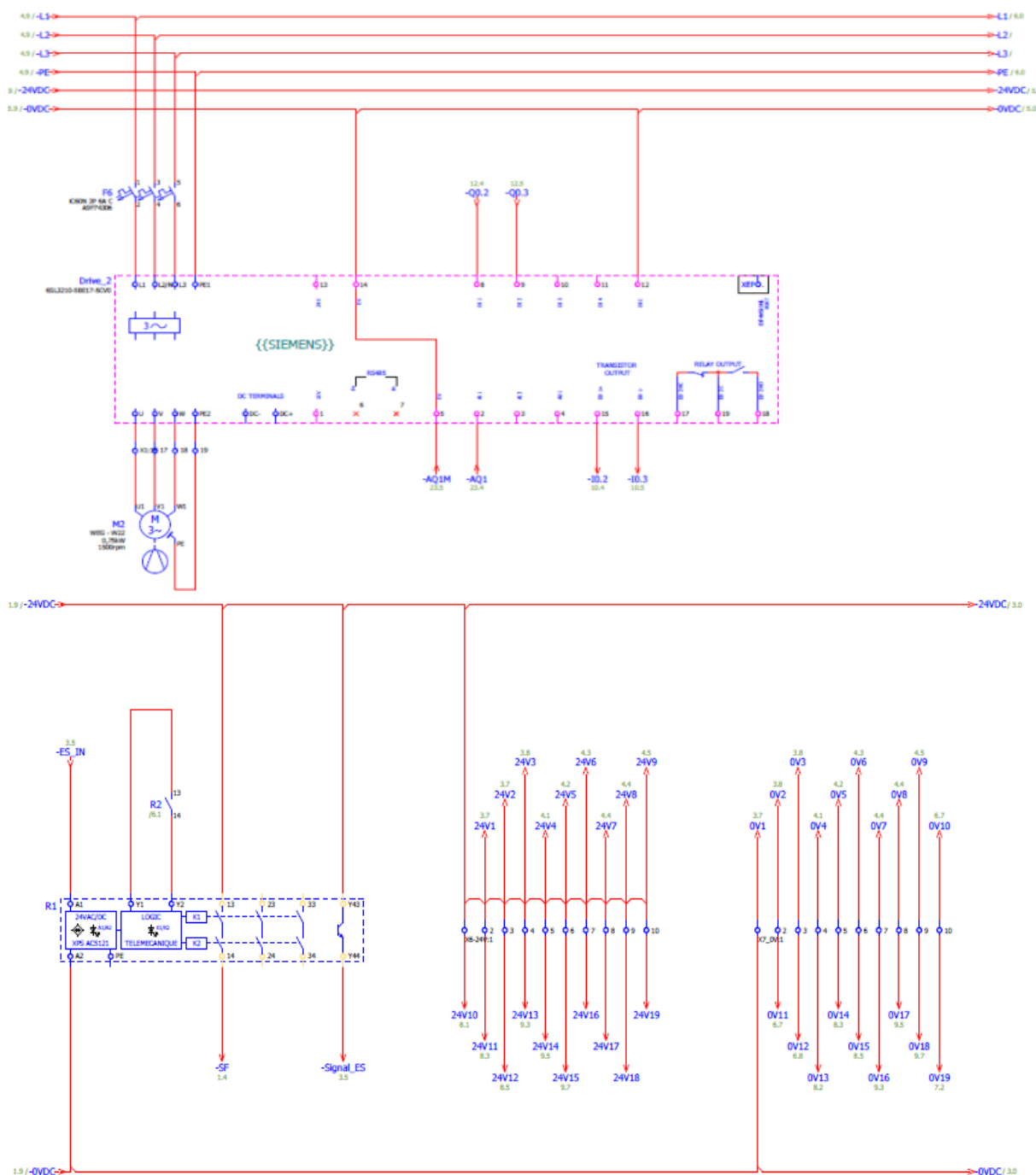


Fig. 2. Part of electrical documentation

3. Development of programming code and visualization of the improved system

To implement the automatic control loop of a moderated mechatronic system and execute the program's step loop, specialized code was created (Fig. 3).

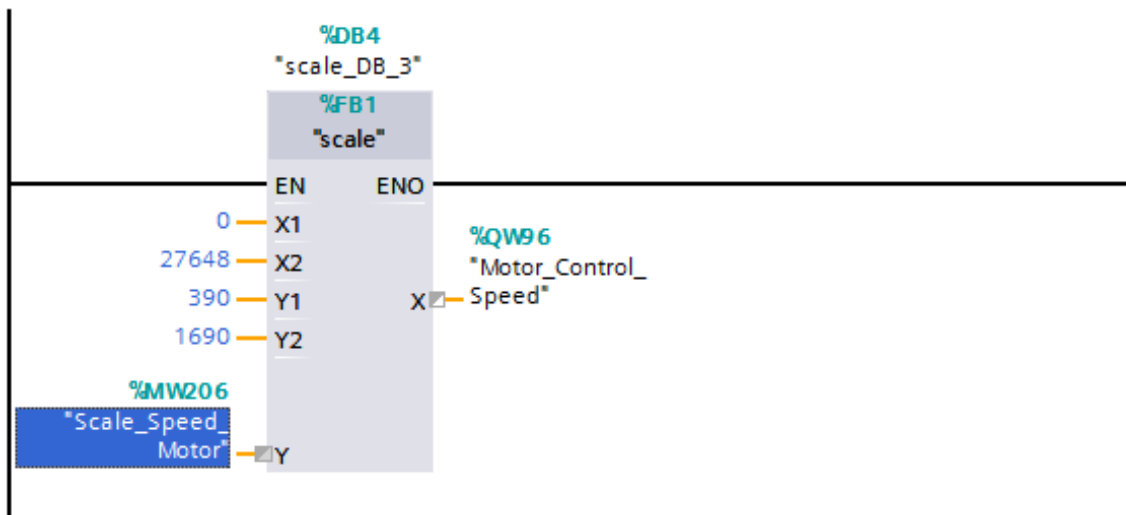


Fig. 3. Part of program code for manual operation mode

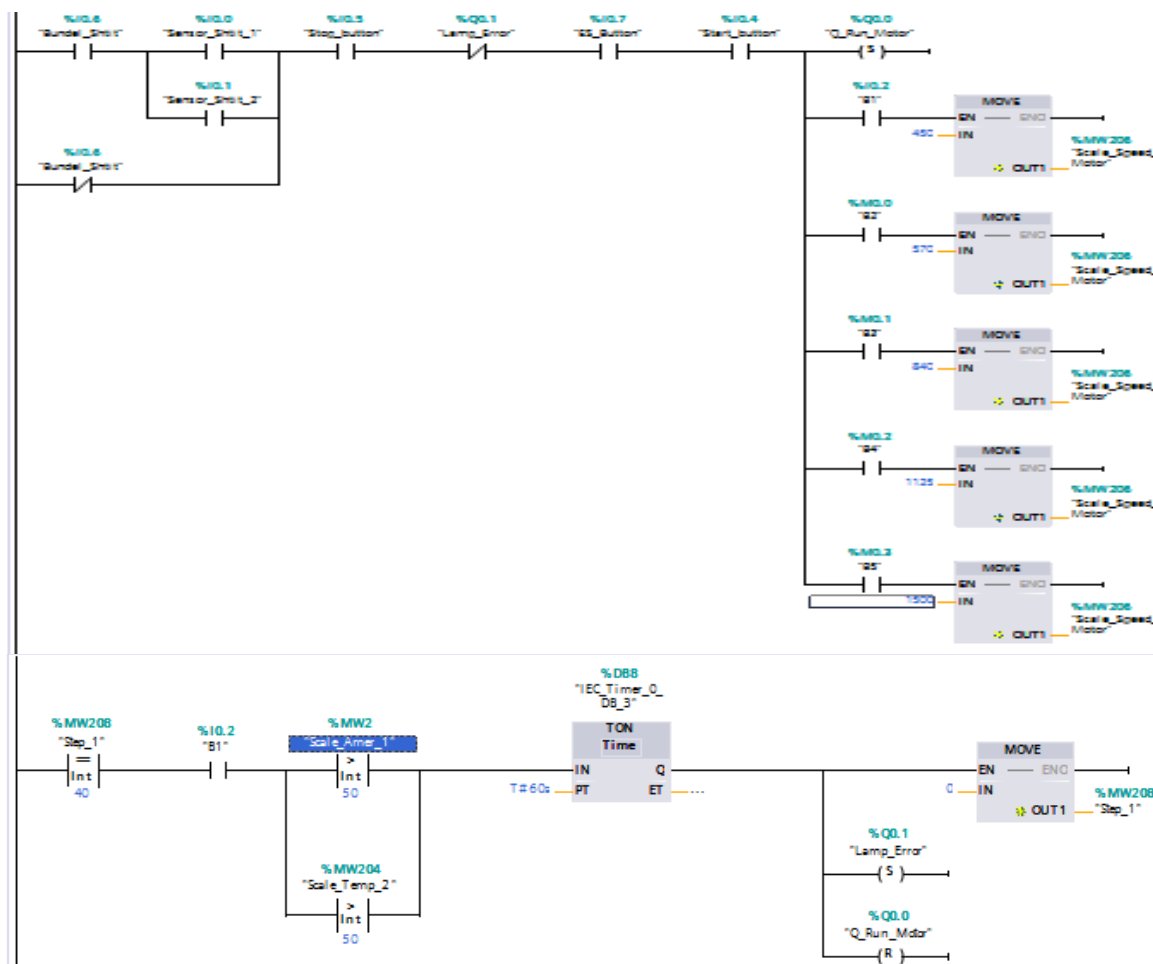


Fig. 4. Part of program code

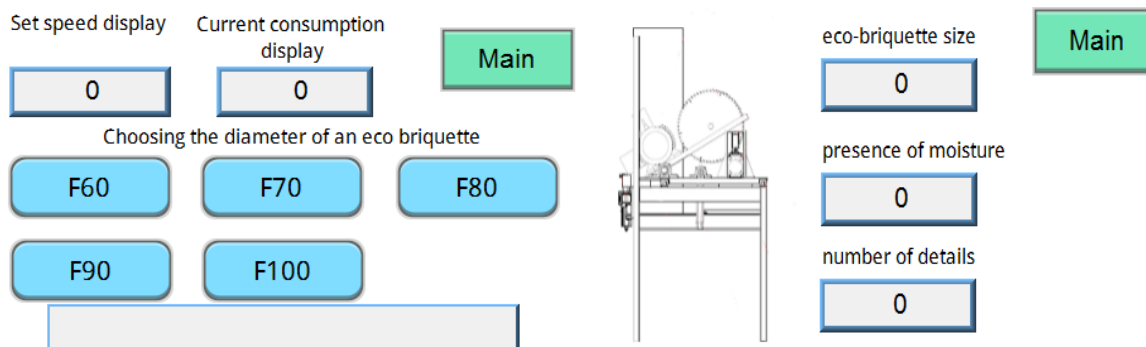


Fig. 5. Visualization of main system

Graphical representation of the variation of current consumed versus briquettes with different moisture contents:

- In the condition of moisture content of 5% and diameter [Ø 60].

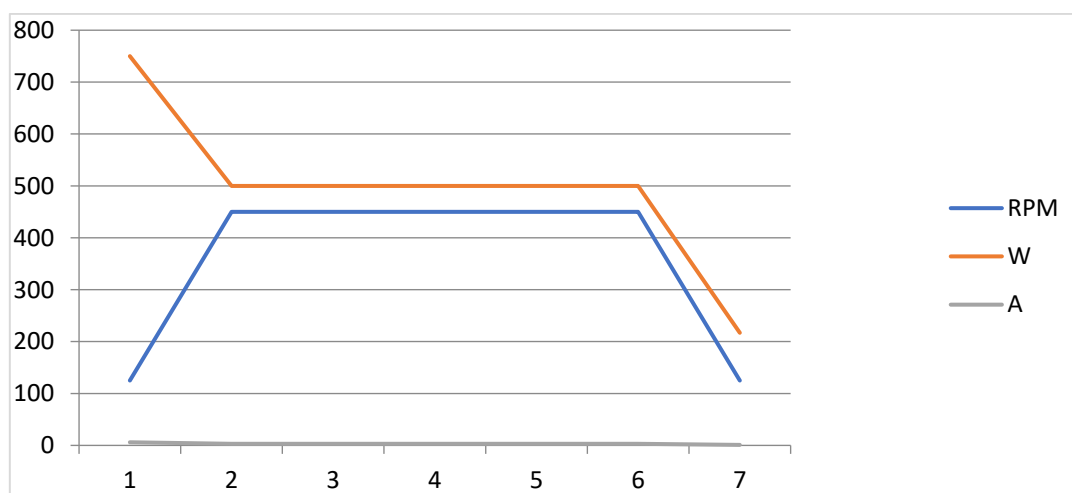


Fig. 6. Electric power consumption in the condition of 5% moisture and diameter [Ø60]

- In the condition of moisture content of 7% and diameter [Ø 80].

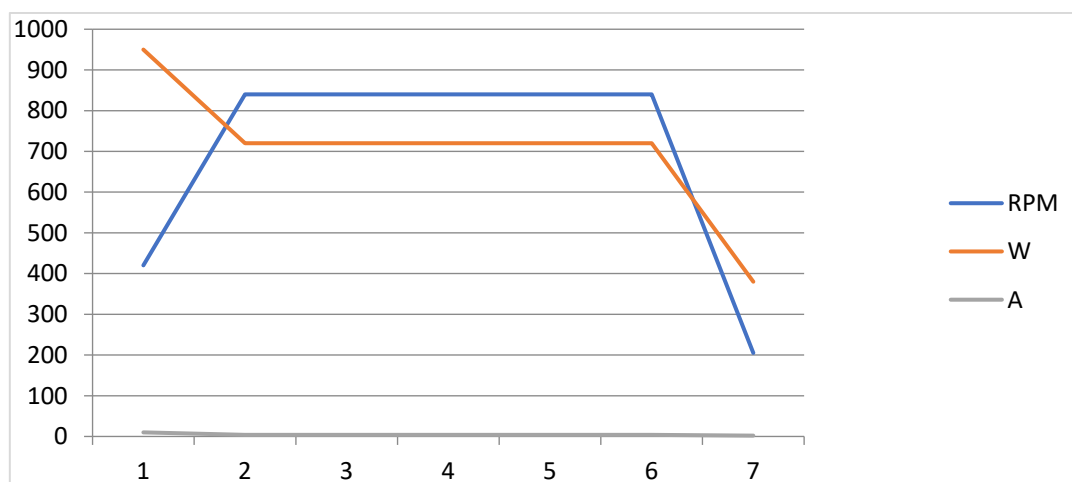


Fig. 7. Electric power consumption in the condition of 7% moisture and diameter [Ø 80]

- In the condition of moisture content of 10% and diameter [$\varnothing$ 100].

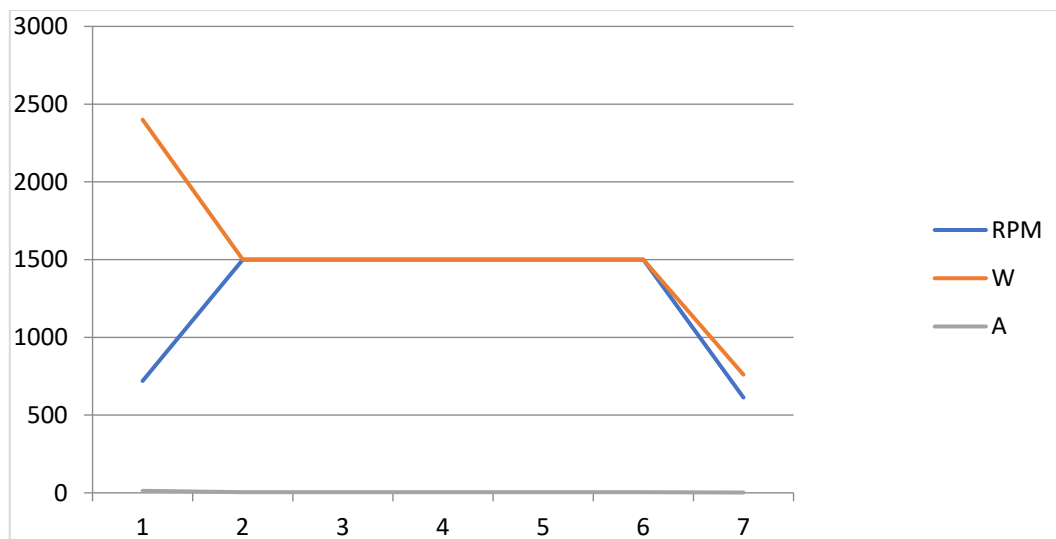


Fig. 8. Electric power consumption in the presence of 10% moisture and diameter [$\varnothing$ 100]

4. Conclusions

As a result of the modernization of the control of the automated mechatronic system, the following results have been achieved:

- Selection of main elements for modernization.
- Preparation of electrical documentation.
- Calculation of main circulator speed relative to system processes.
- Developing program code to control a modernized eco-briquette cutting system.
- Developing a visualization and control system for a modernized eco-briquette cutting system.
- Graphical representation of power variation in relation to different moisture contents.

REFERENCES

- Biliderov, S. (2019). Finding the optimal compensator control matrix in the longitudinal channel for developed MUAUV, *Proceedings XXVII International Scientific Conference Trans & MOTUTO'19*, Year III, Issue 1 (6) ISSN: 1313-5031 (Print), ISSN: 2535-0307 (Online)
- Calovska, R., Biliderov, S. (2024). Simulation and modeling of a UAV mission when performing a flight in an urbanized area, *Journal Automation of Discrete Production Engineering*, Issue 6 / July 2024, ISSN: 2682-9584, pp. 87-90
- Dimitrova, R., Kambushev, M., Biliderov, S. (2020). Method for design of special mechatronic devices and systems, *Journal Automation of Discrete Production Engineering*, Issue 2 / July 2020, ISSN: 2682-9584, pp. 14-17
- Dimitrova, R., Zhmud, V., Petrov, N., Vakarelska, T. (2019). Study accuracy of a transportation system positioning of a test rig for automated mounting of luster terminals, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 659, Issue 1, ISSN 17578981, Article number 012031, Code 154497. DOI: 10.1088/1757-899X/659/1/012031



- Kambushev, M., Chivarov N., Marinov A., Dimitrova R. (2020). Approbation of a mathematical model of a specialized mechatronic system, 11th National Conference with International Participation Electronica 2020, *IEEE Xplore Digital Library*, ISBN: 978-172817531-7, Article number 9305150. DOI: 10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305150
- Malakov, I., Zaharinov, V., Nikolov, S., Dimitrova R. (2023). Computer-aided choosing of an optimal structural variant of a robot for extracting castings from die casting machines, *Journal Actuators*, Volume 12, Issue 9, Article number 363, ISSN:20760825, DOI: 10.3390/act12090363
- Tomov, P. (2017). Increasing the efficiency of automation of production processes by reporting the parameters of the parts' flow. *TEM Journal*. Vol.6, Issue 3, pp. 484 - 487, ISSN 22178309, DOI: 10.18421/TEM63-08.
- Totev, D. (2022). Main problems with the integration of existing systems for automation and control of industrial and manufacturing processes to the requirements of the concept "Industry 4.0", *Journal Automation of Discrete Production Engineering*, Issue 4 / July 2022, ISSN: 2682-9584, pp. 124-128.
- Vladimirov, B., Nikolov, S., Tsolov, S. (2024). Programming industrial robots in the Fanuc ROBOGUIDE environment. *Engineering Proceedings*. Vol. 70, Issue 1, <https://doi.org/10.3390/engproc2024070020>

Ch. Assist. Prof. Slav Dimitrov, PhD

Scopus ID: 57422209500
Technical University of Sofia
Sofia, Bulgaria
E-mail: sbd@tu-sofia.bg

АНАЛИЗ НА СЪЩЕСТВУВАЩИТЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТТА НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕТО МЕЖДУ ИНСТИТУЦИИТЕ ПРИ КИБЕРИНЦИДЕНТИ

Иван Христозов

Военна академия „Г. С. Раковски“, България

Веселина Александрова

Военна академия „Г. С. Раковски“, България

Чавдар Костадинов

Военна академия „Г. С. Раковски“, България

Иван Чакъров

Военна академия „Г. С. Раковски“, България

Резюме. В настоящата разработка се разглежда законодателната рамка в Република България в сферата на киберсигурността. Акцентира се на възможностите за взаимодействията между държавните органи в исторически план и настоящето. На основата на анализ на системи за взаимодействие в сферата на киберсигурността в други страни се прави опит за извличане на поуки и предложения за усъвършенстване на формата на нов дигитален модел.

Ключови думи: киберсигурност, киберинциденти, дигитален модел

1. Увод

През 2015 под кибератака бяха подложени сайтовете на ЦИК, МВР, ДАНС, КЕВР, НАП и парламента по време на провежданите тогава местни избори (Nova, 2015). Въпреки че най-масивната и мащабна атака на Балканския полуостров до този момент успя да ограничи достъпа на потребители до държавните информационни системи, то не се стигна до нерегламентиран достъп и изтичане на данни. България впоследствие се обърна за помощ към САЩ за разследването, като в рамките на сътрудничеството беше обменена информация и технологии за защита от кибератаки. Това от една страна поощрява чуждестранното партньорство, но от друга демонстрира липсата на ресурс за самостоятелно разследване и разкриване източника на атаката и да бъде приведен под отговорност.

2. Досегашно взаимодействие между институциите в Република България

След години на увеличаващи се киберинциденти и атаки към сигурността на българското население и техните данни, изпълнителната власт и институциите дадоха заявка до 2020 г. страната да достигне задоволителни нива на киберустойчивост чрез национална стратегия за киберсигурност. Една от стъпките, които държавата направи бе да подготви и приеме законодателни промени, с които най-накрая да бъде адресирана киберсигурността в България. През 2018 г. българският парламент прие Закон за киберсигурност (ЗКС), с който МС разпорежи управлението и организацията на Национална система за киберсигурност, начело с национален координатор, секторни и национални екипи за реагиране при инциденти с компютърната сигурност (Cybersecurity Act. 2018).

Законът още в своето начало акцентира върху споделената институционална отговорност и съвместна работа. През 2019 г. бе приета и Наредба за минималните изисквания за мрежова и информационна сигурност (НМИМИС).

С нея се гарантира защита на информация и лични данни чрез задължителни технически, организационни и процедурни мерки. Директивите и препоръките на международни организации (ЕС и НАТО) играят важна роля в създаването на национални законодателства по киберсигурност. В България може да се счита, че сегашното законодателство е разработено и прието в отговор на нуждата от създаване на инструмент, който да съдържа тези актове и да гарантира по-добра защита на националната киберсигурност. Академични трудове откриват недостатък в това директно заимстване поради липсата на високо квалифицирани кадри в сферата на киберотбраната. Следва да им бъде направен кратък анализ с фокус върху очакваната съвместна работа на институциите.

2.1. Закон за киберсигурност

Според чл. 2, ал. 1 и 2 от ЗКС, киберсигурността представлява състояние на мрежова и информационна сигурност на обществото и държавата, в което те са защитени от заплахи свързани с мрежи и информационна инфраструктура (Cybersecurity Act. 2018). Това състояние се постига чрез прилагане на множество мерки и действия в дигиталното пространство, както превантивни, така и противодействащи. Самите мерки за мрежова и информационна сигурност по естество са организационни, технически и технологични, като се прилагат спрямо субектите, изброени в чл. 4, ал. 1: административните органи; оператори на съществени услуги и доставчици на цифрови услуги; лица с публични функции, неопределени като оператори или доставчици; организации за обществени услуги, неопределени като оператори или доставчици. По този начин се установява рамката за междуинституционалното взаимодействие, която задължава държавните органи и операторите на критична информационна инфраструктура да работят заедно за гарантиране на сигурността на информационните системи и мрежи. Тази Национална координационно-организационна мрежа за киберсигурност е представена на Фиг.1 под формата на оперативен изглед OV-4 „Диаграма на организационните взаимоотношения“, съобразно рамката за архитектурно моделиране на системи на Министерство на отбраната на САЩ. Минималният обхват на мерките, както и други препоръки и мерки, биват определяни с наредба от Министерския съвет (МС), по предложение на министъра на електронното управление, чието министерство (Министерство на електронното управление (МЕУ) представлява и национален компетентен орган (НКО) за всички административни органи (АО).

- **Съвет по киберсигурността**

Част от системата за защита на националната сигурност е и системата за киберсигурност, чието управление и организиране се осъществява от Министерски съвет, подпомаган от създадения от него Съвет по киберсигурност. Съветът се състои от 17 постоянни членове, с възможност да участват още 6 групи. Главната му задача е да анализира тенденциите, рискове, методи за противодействие и разрешаване и много други, като има постоянно взаимодействие и комуникация с компетентните органи по киберсигурност, национални компетентни органи, национално единно звено за контакт (НЕЗК), регулатори и други институции. Министър-председателят определя с решение и национален координатор по киберсигурността, който също да изпълнява ролята и на секретар на Съвета по киберсигурност. От членовете на съвета, анализът ще се акцентира върху няколко от тях.



- **Министър на електронното управление**

В изпълнение на своите задължения, министърът провежда държавната политика в сферата на мрежовата и информационна сигурност. Той изготвя, предлага на МС и след реализацията на Национална стратегия за мрежова и информационна сигурност по чл. 8, ал.3 от Закона за киберсигурност; координира дейностите за откриване, преодоляване и предотвратяване на кибератаки върху държавните информационни системи и мрежи и консултира органите на държавната власт в тази област и други. Освен тези задължения министерството, в ролята си на национален компетентен орган (НКО), упражнява контрол и регулация върху административните органи (АО).

- **Министър на вътрешните работи**

Министърът на вътрешните работи и органите към министерството противодействат на киберпрестъпността и заплахите от нея на национално ниво. В Главна дирекция „Борба с организираната престъпност (ГДБОП) се организира Център по киберпрестъпност и екип за реагиране при инциденти с компютърната сигурност (ЕРИКС). Те се координират с националния екип за реагиране при инциденти компютърната сигурност (НЕРИКС) по чл. 19 от ЗК. При обоснователни предположения за идентифициране на компютърно престъпление, секторните екипи за реагиране при инциденти с компютърната сигурност (СЕРИКС) на административните органи информират своевременно ГДБОП като в това време се опитват да филтрират или преустановят зловредния интернет трафик.

- **Държавна агенция „Национална сигурност“ (ДАНС)**

На агенцията се възлага да изпълнява политиката по защита от киберинциденти в комуникационните и информационните системи с главен акцент върху стратегическите обекти и дейности за националната сигурност на страната. В нея се формира и развива Център за мониторинг и реакция при инциденти със значително увреждащо въздействие върху КИС на стратегически обекти и дейности от значение за националната сигурност (Център за МРИЗУВ върху КИС на СОДЗНС). Този център е в постоянна готовност за координирана и съвместна реакция с другите органи от националната координационно-организационна мрежа за киберсигурност. В такива случаи, ръководителите на стратегически обекти, които докладват за киберинцидент, са длъжни да филтрират или преустановят зловредния интернет трафик.

- **Административни органи**

ЗКС определя изисквания и към административните органи. Това представляват ръководители на институции, чиито услуги и обхват са неразривна част от нормалното ежедневие на българските граждани и безпроблемно опериране на държавата. Те носят пряка отговорност за мрежовата и информационна сигурност в своя секторен обхват (включващ обектите на критичната инфраструктура на страната), дори когато дейността е възложена на трети страни. Поради тази причина е нормативно записано, че всеки административен орган трябва да одитира, оценява и упражнява контрол върху нивото на мрежова и информационна сигурност. С решение № 192 на Министерски съвет от 09.04.2019 г. са определени 4 административни органи: министъра на енергетиката, отговарящ за сектор „Енергетика“; министъра на транспорта и съобщенията, отговарящ за секторите „Транспорт“ и „Цифрова инфраструктура“; министъра на здравеопазването, отговарящ за сектор

„Здравеопазване“ и министъра на регионалното развитие и благоустройство, отговарящ за сектор „Доставка и снабдяване с питейна вода“.

Всеки един от тях има възложена задачата да създаде национален компетентен орган (НКО) по мрежова и информационна сигурност за съответното ведомство, което да покрива нуждите и отговорностите за съответните сектори и прилежащи подсектори. Ежедневните отговорности на този орган включват: разработване, предлагане и следене за спазване на вътрешни правила и практики за киберсигурност; да поддържа контакти и комуникация с други администрации, звена, организации и експерти в областта на информационната сигурност. В случай на киберинцидент той е длъжен да уведоми съответния секторен ЕРИКС към националния компетентен орган за реагиране на инциденти с компютърната сигурност спрямо приетите комуникационни регламенти в НМИМИС. Периодично следва да бъдат одитирани и оценявани дали изпълняват задълженията си административните органи, оператори и доставчици на съществени услуги (Фиг. 1).

За всеки един сектор също така присъстват и оператори на съществени услуги. Те представляват публични или частни субекти, изброени в приложение №1 на Закона за киберсигурност. Основните им задължения включват предоставяне на съществена услуга, зависеща от мрежи и информационни системи, да спазват подходящи мерки, с които да гарантират ниво на киберустойчивост, а в случай на инциденти да уведомяват незабавно съответните секторни екипи за реагиране. Административните органи са отговорни за определяне на операторите на съществени услуги в съответствие с методика, приета от Министерски съвет, като те биват вписани в непубличен регистър на съществени услуги към министъра на електронното управление.

2.2. Наредба за минималните изисквания за мрежова и информационна сигурност (НМИМИС)

Следващата законодателна рамка, която ще бъде анализирана, е приетата на 19.07.2019. Наредба за минималните изисквания за мрежова и информационна сигурност (НМИМИС) с постановление № 186 от Министерски съвет (Regulation on the general requirements for network and information security, 2008). С нея се уреждат минималните мерки и изисквания за киберсигурност, препоръки, правила за извършване на проверки и процедурата за уведомяване за инциденти. Това включва държавните органи, местните органи, частните организации, учебните институции и други. Тя е важна не само за защитата на критичната информационна инфраструктура, но и за защитата на личните данни на гражданите.

Един аспект от мерките за намаляване на риска от инциденти е гарантиране на човешките ресурси в секторите. Надеждността във ведомствата, имащи отношение към обхвата на процесите и дейностите в наредбата, включва осигуряване на кадри с подходяща квалификация, знания и умения. Ежедневните им задължения могат да включват защитни аспекти, като администриране, сегрегация, филтриране на интернет трафик, криптография, оторизация за използване на устройства и системи, управление на достъпи, физическа защита, защита на сървъри, хардуерни и софтуерни устройства и други. Наредбата има за цел да подобри сигурността на информационните системи в България и да намали риска от кибератаки и други форми на кибер престъпност.

Прилагането на НМИМИС е задължително за всички организации, които обработват и съхраняват информация в електронен формат, и те трябва да гарантират, че изпълняват минималните изисквания.

3. Процес на уведомяване за инциденти с мрежовата и информационна сигурност

В рамките на НМИМИС се предвижда взаимодействие между различни институции и организации в България. Това включва МВР, МО, ДАНС, МЕУ, ДКСИ и много други. С всеобщи усилия и координация може да се гарантира и повиши киберсигурността на информационната инфраструктура.

При настъпване или основателно съмнение/сигнал за кибер инцидент, служителят по мрежова и информационна сигурност или административното дежурно лице информира съответният секторен ЕРИКС в регламентираните срокове – до два часа след първоначално констатиране и до 5 дни административният орган предоставя цялата информация, с която разполага относно инцидента. Според ЗК, секторните ЕРИКС биват уведомявани в случаи на киберинциденти и сигнали с информационни системи и услуги на административните органи, държавни предприятия, фондове, институции и други органи с публични функции, както и в случаи с мрежовата и информационна сигурност на критичната информационна инфраструктура. Националният ЕРИКС (НЕРИКС), който е в състава на Изпълнителна агенция електронно управление (ИАЕУ), бива уведомяван в случаи, когато киберинцидентът има национално или международно значение, като например когато засяга мрежовата и информационна сигурност на критични информационни инфраструктури или на националната сигурност и отбрана на страната. Също така той може да бъде включен в разрешаването на проблеми със значително отражение, засягащи широк кръг потребители.

Формата, която се използва за уведомяване е детайлно описана в приложение № 7 на наредбата. В нея се подават контактите на подателя (имена, телефонен номер, електронна поща), данни на засегнатата организация (дата и час на констатиране, тип на инцидента, кратко описание, въздействие) и данни за предприети действия. Секторните екипи за реагиране в случай на запитване предоставят навременна информация относно действията спрямо инцидента и неговия статут. В случай на значим обществен интерес, може да бъде информирана и обществеността по конкретни казуси.

4. Анализ на взаимодействието между институции в РБ след приемането на ЗК и НМИМИС

През 2019 г. една кибератака доказва колко далече е още страната от постигането на киберустойчивост, как законите и стратегиите за киберотбрана са силни на теория, но лесно преодолими в реалния живот, и как в реална ситуация държавните органи и институции не работят навременно, координирано и ефективно заедно. На 15.07.2019 г. НАП информира за неоторизиран достъп до личните данни на около 5,1 млн. български граждани и компании. Типовете данни, които са били незаконно достъпени са включвали имена, ЕГН, адреси в страната и чужбина, телефони, имейл адреси, данъчно-осигурителна информация и други, обвързани с институции като Агенция Митници, Агенция по заетостта, Агенция за социално подпомагане и НЗОК.

След разкриването на инцидента, държавни органи като МВР, ДАНС, НАП и други бяха ангажирани с реакцията, неутрализирането и противодействието на атаката.

При регистрирането на сигнала, НАП извести МВР и ДАНС. НЕРИКС беше известен и включен в процеса за оценка на проблема и защита на данните, като координираше дейността на другите засегнати органи и даде препоръки за действията, които трябва да се предприемат.

Течът на данни бе определен като дигитален „Чернобил“ - катастрофа с невиджани дългогодишни потенциални последствия, която дава реална оценка на националната киберустойчивост. Редица български и международни медии акцентират върху решаващата роля на взаимодействие за киберсигурността на България и как всъщност с negliжирането на остарелите системи и техните пробойни се е доказало, че България не е достатъчно зряла за да поддържа ефективно сътрудничество между институциите. Критики понесоха МВР, ДАНС и НАП на тема управлението на инцидента и времето за реакция, въпреки наличието на предварителна информация за критични точки в информационната инфраструктура на агенцията по приходи. Комуникацията също показва липса на координация и зряла култура на киберсигурност сред служителите.

5. Изводи

Анализът на досегашното взаимодействие между институциите в страната показва стремеж и намерения за модернизирание и повишаване на киберустойчивостта. В исторически план, преди приемането на Закона за киберсигурност и НМИМС, подходът за реакция и противодействие на кибератаки може да бъде определен, като хаотичен, некоординиран и бавен в определена степен. След отрицателните оценки и препоръки на международни партньори, страната прави крачка напред чрез нова нормативна рамка, която да адресира новите технологични предизвикателства в защитата на държавните информационни системи. Киберинцидентите след тази законова актуализация обаче потвърдиха страната колко е далеч все още от своите партньори, както технологично, така и организационно. В извършеният анализ фокусът е върху разработването на препоръки за подобряване на организацията и взаимодействието между държавни органи при регистриране на кибератака.

Благодарности:

Докладът е написан благодарение на финансиране от Министерство на образованието и науката в изпълнение на Националната стратегия за развитие на научните изследвания 2017 – 2030 по Национална научна програма „Сигурност и отбрана“, приета с решение на Министерски съвет № 731 от 21 октомври 2021 г.

REFERENCES

- Cybersecurity Act. (2018). promulgated in the State Gazette, issue 94, 13.11.2018, last amended by State Gazette 25 of 29.03.2022. (in Bulgarian). [viewed 25 February 2025]. Available from: <https://dv.parliament.bg/DVWeb/showMaterialDV.jsp?idMat=131638>
- Nova, (2015). Hacking attack on several websites of government institutions. (in Bulgarian). [viewed 25 February 2025]. Available from:

<https://nova.bg/news/view/2015/11/01/129110хакерска-атака-срещу-няколко-сайта-на-държавни-институции>

Regulation on the general requirements for network and information security, (2008). of 2008, title amended - SG, issue 5 of 2017, in force from 01.03.2017. (In Bulgarian). [viewed 25 February 2025]. Available from: <https://lex.bg/bg/laws/ldoc/2135606737>

Acknowledgement:

This publication was financed by the Ministry of Education and Science in implementation of the National Scientific Program – Security and Defence that is funded by Ministry of Education and Science of the Republic of Bulgaria in implementation of National Strategy for the Development of Scientific Research 2017-2030 and was adopted by Decision of the Council of Ministers No. 731 of October 21, 2021.

ANALYSIS OF EXISTING SOLUTIONS IN THE FIELD OF INTERACTION BETWEEN INSTITUTIONS IN CYBER INCIDENTS

Abstract. This paper examines the legislative framework in the Republic of Bulgaria in the field of cyber security. It focuses on the possibilities of interactions between the state authorities in the historical perspective and the present. Based on the analysis of systems of interaction in the field of cybersecurity in other countries, an attempt is made to draw lessons and suggestions for improving the form of a new digital model.

Keywords: cybersecurity, cyber incidents, digital model

Assoc. Prof. Ivan Hristozov, PhD

ORCID iD: 0009-0005-1168-676X
Rakovski National Defence College
Sofia, Bulgaria
E-mail: ihristoz@rndc.bg

Assoc. Prof. Veselina Aleksandrova, PhD

ORCID iD: 0000-0002-9119-4618
Rakovski National Defence College
Sofia, Bulgaria
E-mail: v.gagamova@rndc.bg

Assoc. Prof. Chavdar Kostadinov, PhD

ORCID iD: 0000-0001-5358-7122
Rakovski National Defence College
Sofia, Bulgaria
E-mail: ch.kostadinov@rndc.bg

Assoc. Prof. Ivan Chakarov, PhD

ORCID iD: 0000-0002-6062-4806
Rakovski National Defence College
Sofia, Bulgaria
E-mail: i.chakarov@rndc.bg

СЪЗДАВАНЕ И МОДЕЛИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА КАЧЕСТВОТО В АВТОМАТИЗИРАНО ПРОИЗВОДСТВО

Петър Маринов

Технически университет – София, България

Резюме. В работата се представя система за управление на качеството, която има за цел да подобри организацията и работата на автоматизирано поточно производство. Системата моделира и функционалностите на автоматизираното производство. Тя отчита политиката за качество на производството като отчита критични процеси за качеството, определя ефективността на всяка производствена стъпка търсейки възможности за подобрене. Също така спомага за минимизиране на рисковете и броя на повредите. Системата предлага планиране на процеси и работни стъпки за възможните подобрения на качеството. Следи за изпълнение на поточното производство като събира информация за качеството на отделните етапи и отчита ефектите от подобренieto. Формалният подход за създаване на системата се базира на IDEF (Integration Definition) програмен език за функционално моделиране и симулиране на данни като е използвана и техниката за системен анализ и дизайн (SADT).

Ключови думи: метод за проектиране, инструменти за проектиране, управление на качеството, моделиране, мониторинг, вземане на решения

1. Увод

В тази статия се предлага метод за създаване на система за управление на качеството на поточно роботизирано производство. Целта му е да предостави на производствената система инструмент за оптимизация на системата чрез повишаване на производителността и подобряване на организацията.

Първата цел е да се провери функционалната последователност на системата. В този случай качеството се моделира със софтуер за моделиране на производствените функции, който предлага анализ, разработка, реинженеринг и интеграция на информационни системи. Това предполага разширяване на анализа до динамична производителност на системата и оптимизиране на използването на ресурсите в тази система.

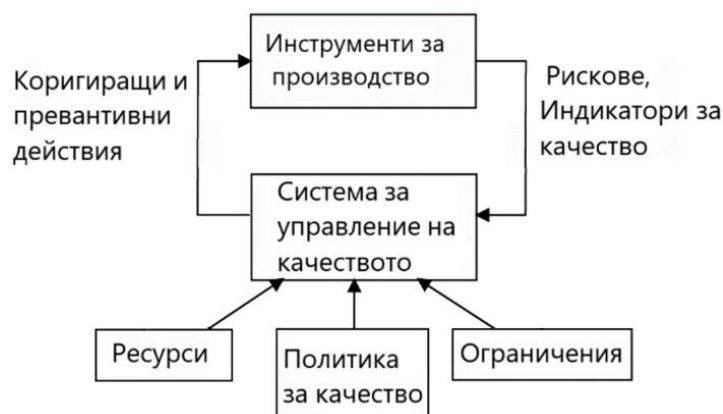
Внедряването на система за управление на качеството има за цел да подобри организацията и работата на процес, състоящ се от много етапи. Този модел позволява да се моделират дейностите, функционалните връзки и данни в една организация, като се използват техники за реинженеринг. Развитието в областта на управлението на качеството се фокусира върху дизайна и документирането на системи за управление на качеството, без да се отчита внедряването на такава система в организацията. (Kumarasinghe, 2021). Малко изследователи представят методи за прилагане на тази система.

Има също дадени конкретни насоки процесът на проектиране на нови продукти да се направи по-надежден на ниво управление на информацията, включително стъпки за внедряване на система за управление на качеството (Cach, 2023):

- Анализират се проекта за процеса за откриване на първи елементи от моделирането му;

- Анализират се методите за отчитане на рисковете;
- Доказателство, че рисковете могат да се управляват формално по отношение на разходите, времето и изпълнението.

Методът, който се разглежда тук се фокусира върху системи за управление на качеството при поточно дискретно производство, където съществува мониторинг и има нужда реализацията на различните изработени продукти да бъде допълнително валидирана. Това води до допълнително забавяне. Принципът на управление на качеството на производството е илюстриран на Фиг.1.



Фиг. 1. Принцип на управление на качеството

Предлаганите стъпки за внедряване на система за управление на качеството на поточно автоматизирано дискретно производство са:

- Уточняване на политиката и целите за качество ;
- Определяне на критични процеси за качеството;
- Определяне ефективността на отделната операция и подобрението;
- Определяне действия за намаляване броя на повреди и несъответствия;
- Определяне на рисковете и подобренията за най-добри резултати с минимален риск;
- Планиране стъпките за набелязаните подобрения;
- Изпълнение на плана за действие;
- Проследяване на ефектите от подобренията;
- Оценка на получените спрямо очакваните резултати;
- При обновяване целите за качество - към стъпка 1, иначе – към стъпка 3.

2. Описание на фирмата

Отделът за поддръжка играе важна роля за организирането и работата на поточно роботизирано производство. Ролята му е да осигури правилното функциониране на машините и да извършва всички операции по превантивна и коригираща поддръжка. Отделът за поддръжка разполага със собствени човешки и технически ресурси. Човешките ресурси са екипи от оператори за поддръжка. Намаляване на броя на тези оператори не добавя много към печалбата. Техническите ресурси са оборудването и материалите, необходими за извършване на поддръжка.

Нужда от материали или оборудване трябва се заявява чрез службата за закупуване и е обусловена от техническия бюджет и ограниченията за всяка покупка. Съгласуването води до допълнително забавяне. Има два вида поддръжка: периодична превантивна и коригираща. Данните, необходими за задействане на поддръжките, се изпращат от системата за мониторинг.

3. Метода за изграждане на система за управление на качеството

- **Стъпка 1:** Уточняване на политиката и целите за качество. Политиката на качеството позволява дейността на поточната линия да гарантира удовлетвореността на клиентите. Клиентът представлява и системата за мониторинг, и спонсор и бенефициент на операциите по поддръжка. Това изисква производството да работи правилно.
- **Стъпка 2:** Определяне на критичните за качеството процеси във връзка с целите. Основните процеси за постигане на качество са: процесът на поддръжка, процесът на закупуване и процесът на обучение.

Фиг.2. показва моделирането на процеса на поддръжка. Ограниченията са информацията от мониторинга и качеството на инструментите. Насочващите елементи за тази дейност са: бюджетът, превантивната и коригираща поддръжка и нормативите за износване на машини и компоненти.



Фиг. 2. Схема на процеса на поддръжка.

Процесът е важен, тъй като осигурява наличието на технически ресурси, необходими за гладкото протичане на поддръжката. Процесът на обучение предоставя уменията, необходими за правилно извършване на операциите. Средствата за обучителния процес са от техническия бюджет на фирмата.

Компетентността се изисква или придобива. Тя изисква средства и се постига в определен контекст, свързан с изпълнението на задачи. Категориите ресурси за компетентност са: знания, ноу-хау, опит, способности, способности, личностни черти. Освен това има и структуриране на ресурси за умения в категории. (Mizrak, 2023) Компетентността може да се дефинира чрез комбинация от ресурси за финализирано изпълнение в даден контекст.

- **Стъпка 3:** Определяне на ефективността на всеки отделен етап от процеса и търсене на възможности за подобрене. Системата за управление разчита на анализ на процеси и техники за статистически контрол, за да се предоставят данните, необходими за извършване на корекции или подобрения на процеси, които не работят при определени условия (Magd, 2020).

Процесът на поддръжка на машините изисква подходящо оборудване за манипулиране - прецизни инструменти и квалифицирани оператори по поддръжката. Ефективността на поддръжката се мери с тестове за ефективност на ремонтираното оборудване, степента на успешна интервенция и средното време за правилно функциониране. За ефективността на процеса на закупуване се проверява съответствието между изискваното качество за инструментите и качеството на закупените инструменти. При тренировъчния процес се определя ефективността на обучението, която може да се оцени от степента на успешна интервенция и скоростта на интервенцията.

- **Стъпка 4:** Определяне на действия за намаляване броя на повреди и несъответствия. Използва се диаграма причина-следствие, която помага за уточняването и на връзките между причините (класификация) (Pillet, 2001).
- **Стъпка 5:** Определяне на рисковете и избор на подобрения осигуряващи най-добри резултати с минимален риск. Основните рискове могат да се класифицират в три категории: разходи, време и съответствие. Рискът от разходите е свързан с доставените продукти (материалите и обучението) за правилното функциониране на услугата. В зависимост от размера на използваните машини в автоматизирано производство, рисковете, свързани с времето, необходимо за предоставяне на оборудването за поддръжка, зависят главно от наличните инструменти и транспортните средства. За да се улесни изборът на подобрения и тяхното планиране, има разделение между рисковете и свързаните с тях ограничения. Предложен е и път за планиране на избраните подобрения.
- **Стъпка 6:** Планиране (процедури, процеси и средства) за прилагане на подобренията. Изборът за модификация или смяна на машините е резултат от решение на ръководството. Рискът в този случай е висок и забавен.

4. Формален подход

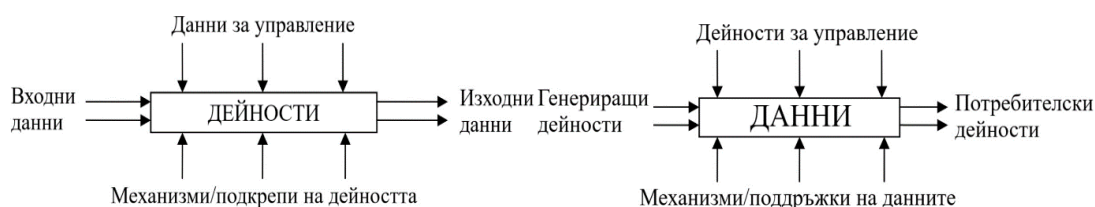
Важно е да има формални инструменти за проверка на функционалната последователност на процесите и възможност за подобряването и управлението им. Предлагаият подход се основава на инструмента IDEF, който дава ясно функционално представяне на системата и връзката между различните функции.

IDEF (Интегриран компютърен език) дефинира архитектурата на индустриалните системи. Той осигурява анализ и комуникация между хората, участващи в подобряването на производството (Cheung, 1998). Тук се използва за анализ, дефиниране и моделиране на процесите и дейностите на поточното производство (Schaefer 2024). IDEF е съставен от модули : Моделиране, базирано на дейности (IDEF0), Информационни модели (IDEF1), Модели за симулация (IDEF2), Описание на процеса (IDEF3), Обектно-ориентиран дизайн (IDEF4), Описания на онтологията (IDEF5), Улавяне на концептуални рационалности (IDEF6), Метод за одит на информационни системи (IDEF7), Моделиране на потребителски интерфейси (IDEF8), Спецификации за дизайн, базирани на сценарии за информационни системи (IDEF9) и т.н. Тук са използвани методите IDEF0 и IDEF3.

IDEF0 е базиран на „техника за структуриран анализ и проектиране“ (SADT). **SADT** се състои от две части: 1) дефиниране на функциите на система (структуриран анализ) и 2) разработване на модел (технически дизайн). Прилага се за производствени и промишлени процеси (Peffer, 2005).

На първо място, анализът чрез SADT на дадена система позволява да се конструира модел като поредица от действия и данни, които са по-малко сложни от първоначалните. SADT е йерархичен, модулен и структуриран метод за анализ отгоре надолу. Той позволява изваждането на максимално количество детайли при декомпозицията. Дълбочината на последната зависи от информационната свързаност между различните нива. Всяка диаграма от по-ниско ниво съдържа ограничено количество информация, свързана с конкретна тема.

SADT разделя на „КАКВО“ и „КАК“ чрез функционално описание на системата, независимо от различните решения за нейното внедряване. Той има две нива на абстракция: концептуално и организационно. Моделира системата според „данни“ и „действия“, представени с дейтаграми и актиграми (Фиг.3.).



Фиг. 3. Актиграма и дейтаграма на модела SADT

Между IDEF и SADT моделите има общи точки. Например IDEF0 е идентичен на описание от SADT актиграми, а IDEF1 е еквивалентен на SADT дейтаграми.

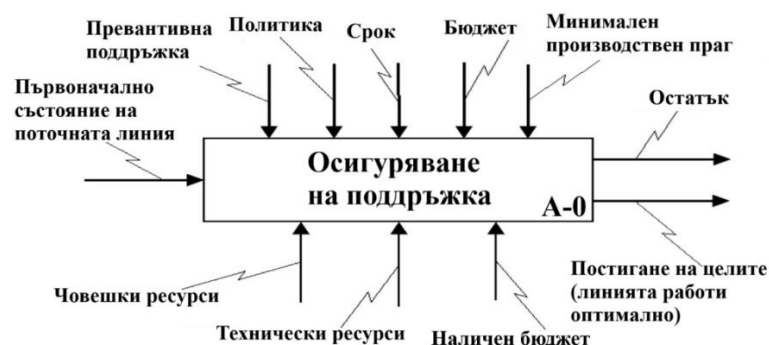
IDEF3 е метод за графично моделиране на сложна система чрез диаграми и информационни документи. Блок-схемите са от четири елемента: 1. Отделната единица (обект или артефакт, който може да се произведе от системата), отразена с правоъгълник, разделен на три зони: име, ниво в йерархичното декомпозиране и номер на възможна свързана IDEF0 дейност; 2. Връзките за свързване на единиците; 3. Логически оператори («И», «ИЛИ» и «само», «ИЛИ»); 4. Препратки, на IDEF3 за достъп до част от модела (или до друг модел) (Vernadat, 1999). Получените IDEF3 модели са качествени, но не позволяват анализ и оптимизация на процесите.

В IDEF3 се записва процесът в съответствие с приоритетните и причинно-следствените връзки между дейностите и събитията. Той е структуриран метод и се състои от два модела за описание на потока на процеса и на прехода на състоянието. С метода IDEF3 причинно-следствените и прецедентните връзки в поточен производствен процес се изразяват лесно. Този метод не отчита човешкото присъствие. Други разширения на метода IDEF включват и ресурси (Aguilar-Savén, 2004). Тук мета-моделът на IDEF3 е изграден с принципите и концепциите на UML (Unified Modeling Language) на C++. Описанието на процеса е структурирано около конструкцията на единица за поведение (UDC), която е всеки етап от процеса. За да формират сценарии, UDC се свързват чрез връзки и логически съединители. Те преобразуват контролните потоци, синхронни или асинхронни, на даден процес.

5. SADT модел на поддръжка

SADT модел за поточен производствен процес започва с избор на цел и гледна точка, т.е. система за управление на качеството за поддръжка в автоматизирано дискретно производство. Следва създаването на диаграма A0 за общата рамка на поддръжката. Тя съдържа записите, резултатите, получени след дейността, ограниченията и наличните ресурси. После се създава база данни с експерти. Следва организиране на получените данни в списък, групиране на данните, създаване на списък с дейности на базата на групирани данни, групиране на дейности, обработващи едни и същи групи данни, и детайлизиране на услугата.

Диаграма A0 съдържа четири дейности на поддръжката: организацията, изпълнението, мониторинга и подобряването на производителността (Фиг.4.)



Фиг. 4. SADT модел - Диаграма A0

Диаграма A1 дава организацията на поддръжката, която се състои от три дейности: 1) планиране на действията, 2) определяне и разпределяне на човешки и технически ресурси и 3) определяне на разходите (Фиг.5.).

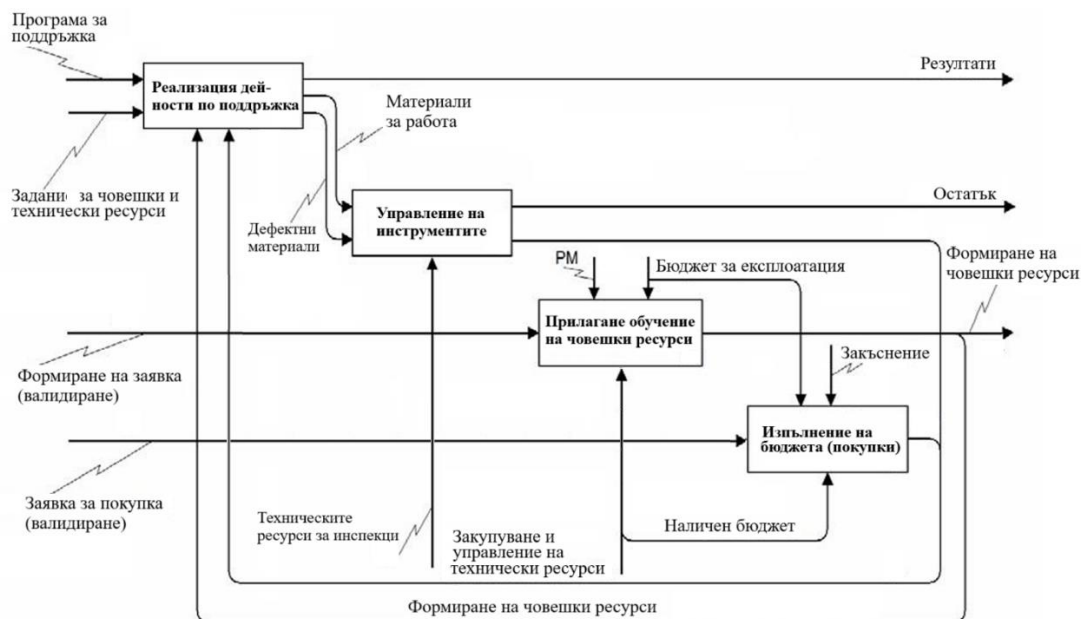


Фиг. 5. SADT модел - диаграма A1

При определяне на първоначалното състояние на техниката (количество, позиция, състояние на компонентите и т.н.) се изпраща и информация за стартиране на разпределяне на човешките и техническите ресурси.

Програмата за поддръжка взема предвид минималния праг на производство. Резултатът е разпределението на човешки и технически ресурси, заявки за закупуване на липсващи компоненти и за обучение на човешки ресурси.

Диаграма А2 дава изпълнението на поддръжката. Съдържа четири кутии.



Фиг. 6. SADT модел - Диаграма А2

Използвайки програмата за поддръжка като входни данни и минималния производствен праг като контролно ограничение, резултатът е завършване на поддръжката с ново състояние на инсталацията. Друг резултат от тази дейност е състоянието на инструментите, използвани за извършване на поддръжката, които трябва да бъдат проверени, за да са готови за последваща поддръжка.

Дейността по обучение на човешките ресурси е ограничена от бюджета. Резултатът е обучени специалисти, постигащи нивото на качество на исканата работа. Последната дейност е реализирането на продукцията. Тя се задейства от заявки на клиентите. Резултатът е наличието на технически ресурси, като оперативният бюджет и срок за доставка.

Диаграма А3 дава двете управляващи дейности за поддръжка. Първата е управлението на действията по поддръжката. Новото състояние на техниката от извършената поддръжка се взема като входни данни, разликата между намеряваните цели и получените резултати като изходна информация и програмата за поддръжка като управляващи данни.

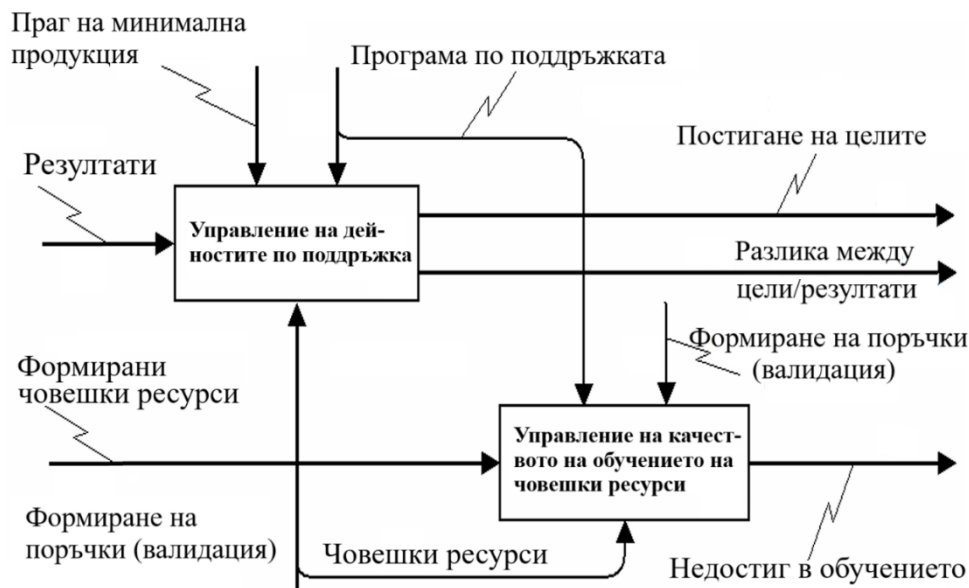
Втората дейност започва с обучените човешки ресурси като вход за управление на качеството на обучението. Резултатът е разликата между полученото и планираното обучение. Ограниченията са валидирането на планираното обучение и програмата за поддръжка.

Диаграма А4 дава дейностите по наблюдение и подобряване на поддръжката. Входът е разликите в обучението и Цели/Резултати.

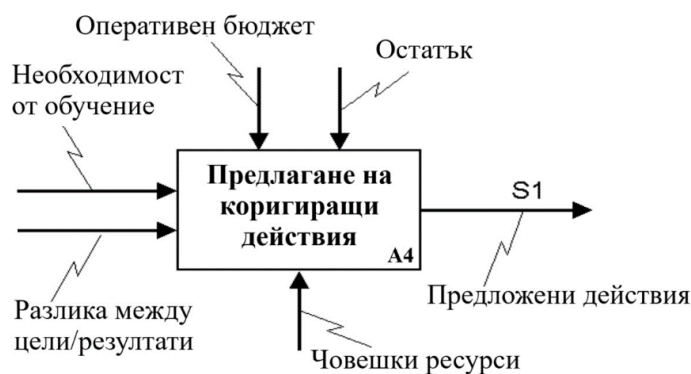
Бюджетът е ограничение за предлагането на коригиращи действия. Резултатите от тази дейност са предложените коригиращи и превантивни действия.

Моделът IDEF3 на диаграма A2 (Фиг.6.) описва контролния поток на процеса поддръжка. Има две решения за извършване на поддръжка.

Едното е извършване на обучение или закупуване на човешки ресурси. Второто е извършване на дейности по поддръжка и контрол на работните инструменти. Пунктираната стрелка моделира връзката между двете дейности.



Фиг. 7. SADT модел – Диаграма A3



Фиг. 8. SADT модел - Диаграма A4

6. Заключение

Представен е метод за изграждане на система за управление на качеството, която е инструмент за управление имащ за цел подобрене на организацията и работата на автоматизирано поточно производство.

Методът се състои от десет стъпки. Използването му води до изявяването на рисковете и свързаните с тях ограничения и до определяне на решение за всеки риск и измерването на ефективността на всяко такова решение.

Методът дава и възможност рисковете и свързаните с тях ограничения да бъдат разделени, което улеснява изборът на подобрения и начинът на осъществяването им.

В работата също така е предложен формален подход, базиран на IDEF, позволяващ ясно функционално представяне на производството, както и връзката между различните функции. Чрез моделиране с IDEF се постига проверка на функционалността на системата, включително и практически стъпки (стъпки 7, 8, 9 и 10).

Тези стъпки позволяват внедряването на система за управлението на качеството, но са недостатъчни за потвърждаването на успеха на метода. Въвеждането на формални инструменти за проверка на функционирането на процесите и възможността за подобряване и контрол на процесите е един следващ етап в подобряването на разработения метод. Предложеният за поддръжка модел SADT спазва принципа за постоянното подобрене (PDCA), състоящ се от четири стъпки - планиране (Plan), практическа работа (Do), проверка (Check) и действие по подобрене (Act). Прилагането му в работните процеси доказано повишава контрола и постоянното усъвършенстване на крайните продукти.

REFERENCES

- Aguilar-Savén, R. (2004). Business process modelling: review and framework, *International Journal of Production Economics*, Vol. 90 (2), pp. 129-149.
- Cach, P., Daalhuizen, J., Hekkert, P. (2023). Evaluating the efficacy and effectiveness of design methods: A systematic review and assessment framework, *ELSEVIER, Design Studies*, Vol. 88, September 2023, 101204, Available from: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2023.101204>
- Cheung, J., Bal, J. (1998). Process analysis techniques and tools for business improvements, *Business process management journal*. vol.4, 274-290.
- Kumarasinghe, H., Dilan, H. (2021). Organizational change and change management, In book: Contemporary Innovations in Management (pp.49-69), *Publisher: Global Learners Academy of Development Korattur, Tamilnadu, India, July 2021, Chennai – 600 080.*
- Mizrak, F. (2023). Effective change management strategies: exploring dynamic models for organizational transformation, *In book: Perspectives on Artificial Intelligence in Times of Turbulence*, pp.135-162, Available from: DOI:10.4018/978-1-6684-9814-9.ch009
- Magd, H., Karyamsetty, H. (2020). Integrated management system implementation in smes: a proposed model for organizational performance and sustainability, *International Journal of Business and Management Review*, *Published by ECRTD-UK* Vol. 8, No. 4, pp. 58-77.
- Peffer, K., Tuunanen, T. (2005). Planning for is applications: a practical, information theoretical method and case study in mobile financial services, *Information & Management*, 42, pp. 483-501.
- Pillet, M. (2001). Appliquer la maîtrise statistique des procédés (MSP/SPC), *Editions d'Organisations*, Paris.
- Schaefer, K. E., Brewer, R. W., Wickwire, J., Scalise, R., Kessens, C. C. (2024). Modeling and simulation technologies for effective multi-agent research. In: Chen, J.Y.C., Fragomeni, G. (eds) *Virtual, Augmented and Mixed Reality*. HCII



2024. *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Cham, vol 14707.
Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61044-8_7

Vernadat, F. (1999). Techniques de modélisation en entreprise : application aux processus opérationnels, *Economica*.

DESIGN AND MODELING OF A QUALITY MANAGEMENT SYSTEM IN AUTOMATED PRODUCTION

Abstract. The work presents a quality management system that aims to improve the organization and operation of automated flow production. The system also models the functionalities of automated production. It takes into account the production quality policy by considering critical quality processes, determines the effectiveness of each production step, looking for opportunities for improvement. It also helps to minimize risks and the number of failures. The system offers planning of processes and work steps for possible quality improvements. It monitors the implementation of flow production by collecting information about the quality of individual stages and taking into account the effects of the improvement.

The formal approach to creating the system is based on IDEF (Integration Definition) programming language for functional modeling and data simulation, and the system analysis and design technique (SADT) is also used.

Keywords: design method, design tools, quality management, modeling, monitoring, decision making

Ch. Assist. Prof. Petar Marinov, PhD

Scopus ID: 59412194800

Technical University of Sofia

Sofia, Bulgaria

E-mail: pmarinovtusofia@gmail.com



DYNAMIC MODELING OF A QUALITY MANAGEMENT SYSTEM IN AUTOMATED PRODUCTION

Petar Marinov

Technical University of Sofia, Bulgaria

Abstract. This paper presents a dynamic approach to creating a quality management system for an assembly line for automated discrete manufacturing based on Petri nets. The system thus created allows for additional analysis of the dynamic behavior of the production system, taking into account the availability of resources for each activity separately, some of which are consumed during the production process. An integration of the SADT tool and Petri nets is proposed for more convenient modeling and greater functionality of the quality management system. A temporal SADT model for a quality management system is also considered and compared with the constructed dynamic model.

Keywords: Petri nets, Mathematical model, Analytical models, modeling, simulation

1. Introduction

A SADT model of a quality management system in flow manufacturing was proposed in (Marinov 2025). This model covers the functionalities of the system and their interactions, but does not allow for the analysis of its dynamic behavior. This work considers the dynamic modeling of a quality management system for automated discrete manufacturing using a Petri net. A Petri net is a formal approach with a rigorous mathematical basis, using graph theory. First, a Petri net is presented. Then, a combination of SADT modeling with a Petri net is proposed. The constructed SADT model of the quality management system is improved by upgrading it with a Petri net, which adds the ability to analyze and detect possible blockages in the functioning of the system, as well as to establish adequacy between resources and set goals. Then, resource allocation in a production quality control system is discussed. A temporal SADT model of the quality management system is also considered. The two created models are compared.

2. Petri nets

Petri Nets are a powerful tool for modeling and analysis in the study of discrete manufacturing systems. Petri Nets offer a graphical notation of step-by-step processes containing selection, iteration and parallel execution. They have a precise mathematical definition of the semantics of their execution, with a well-developed mathematical theory for process analysis. They are applied to real-time systems, robotic systems, distributed systems, artificial intelligence, etc. A certain inconvenience exists when the modeling system is complex and the Petri Net is large, because in this case its graphical representation is difficult to visualize (Fakhredaie, 2015).

The quality management system develops depending on events. The constraints on the occurrence of these events can be deterministic or stochastic. Deterministic constraints affect the implementation of audits and monitoring of quality procedures. The stochastic aspect emerges from quality control, which influences the frequency of machine tuning and therefore the performance. In this work, autonomous Petri nets, temporal Petri nets and stochastic Petri nets are used (Grobelna, 2021; Drighiciu, 2017; Lafortune, 2018).

2.1 Autonomous Petri net

One of the things that makes Petri nets interesting for application is that they provide a balance between modeling and analysis.

Many things that are desirable to know about competing systems can be automatically determined for Petri nets. In the general case, some of these things are very resource-intensive to determine. There are subclasses of Petri nets that model interesting classes of competing systems, and the workflow is simpler.

A Petri net is a directed bipartite (two-colored) graph that has two types of nodes – transitions, i.e. discrete events that can occur, and positions (places), i.e. conditions, and its directed arcs describe which positions are pre- and/or post-conditions for which transitions. Places are represented by circles, and transitions by rectangles. Each arc connects only one place to one transition or a transition to a place. Each place can contain one or more characters. The state of the network is defined by a marking vector of non-negative integers whose dimension is equal to the number of locations. Each element of the marking vector stores the number of markings at the associated location.

Mathematically, a Petri net is the quintet $N = (P, T, A, Pre, Post)$ of finite sets, where: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ is the set of places, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ is the set of transitions, $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ is the set of edges, $Pre: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$, $Pre(p_i, t_j)$ is the set of weights of the edges connecting a place p_i to a transition t_j , and $Post: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$, $Post(t_j, p_i)$ is the set of weights of the edges connecting a transition t_j to a place p_i .

A labeled Petri net is a pair $R = (N, M_0)$, where N is a Petri net and M_0 is the initial labeling.

Let *t_j и t_j^* be the sets of input and output locations of the transition t_j , and *p_i and p_i^* be the sets of input and output transitions at location p_i .

A transition t_j is of a marking M if and only if, $M(p) \geq Pre(p_i, t_j)$, $\forall p \in {}^*t_j$, where $M(p)$ is the marking of location p . A marked transition can be crossed. Crossing a transition t_j consists of removing $Pre(p_i, t_j)$ marks from each location $p_i \in {}^*t_j$ and adding $Post(p_k, t_j)$ marks to each location $p_k \in t_j^*$. Crossing a transition is an instantaneous operation. Crossing a transition leads from a marking M to a new marking M' . The marking M is reachable from the initial marking M_0 if there exists a crossing sequence transforming M_0 into M . The evolution of the marking of a Petri net can be described by the fundamental equation of Petri nets:

$$M = M_0 + W\sigma \quad (1)$$

$$(W(p_i, t_j) = Post(p_i, t_j) - Pre(p_i, t_j)) \quad (2)$$

where σ is a sequence of traversable transitions transforming M_0 into M .

An output transition is a transition without an entry point, it is always traversable. A source is a transition without an exit point (Fig. 1).

For the reachability of a given Petri net N and a marking, a defined. $A(N, M_0)$ denotes the set of reachable markings of the Petri net N with respect to the initial marking M_0 .

A Petri net is alive if and only if $\forall M \in A(R, M_0)$ there exists a sequence of transitions that can be intersected by M , containing all transitions.

A Petri net is reversible if and only if there exists a sequence of transitions transforming M into M_0 for $\forall M \in A(R, M_0)$.

A Petri net is bounded if there exists a number $k > 0$ such that $\forall A(R, M_0)$ for which $M(p) < k$.

In the present work, a Petri net is used that is reachable, alive, reversible, and bounded.

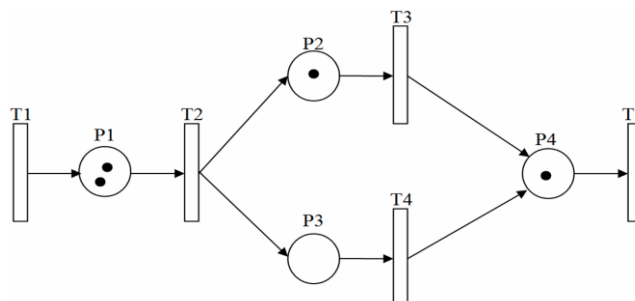


Fig. 1. Transition: T1 is a source, T5 is an output, $M_0 = [2, 1, 0, 1]$ is the initial marking

2.2. Temporal Petri nets

When transitions are functions of time, we arrive at a T-time Petri net (Liu, 2022). When time is associated with locations, we arrive at a P-time Petri net (Diallo, 2015). Here we use a T-time Petri net. A transition can be traversed if it is validated without interruption by marking locations for at least a duration equal to the associated time delay.

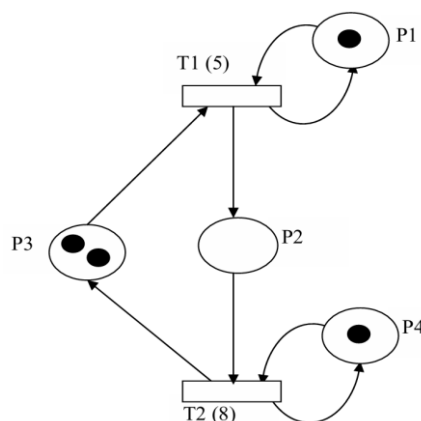


Fig. 2. Time Petri net with time 5

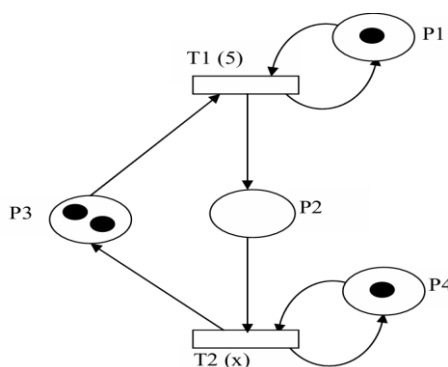


Fig. 3. Stochastic Petri net for transition T1 and time 7 for transition T2

In the T-time Petri net, tokens have a minimum dwell time at each location and during this time they cannot be used for transition (Fig.2). The time in the production system is the time it takes for the machine to make the product.

2.3. Stochastic Petri net

In a stochastic Petri net, the structure is the same, but the intersection of certain transitions is determined by random variables (x) (Fig.3).

3. Transition from IDEF0/SADT to Petri Nets

There are publications related to IDEF0/SADT and Petri Nets. The method in (Gehlot 2021) is based on the annotation of the SADT model with information describing the input/output relationships by explicitly specifying the meaning of the arrows. Rules are derived for constructing a colored Petri net associated with the annotated SADT model, which can be simulated.

In (Koziolek, 2020) the authors propose rules for transforming a SADT model into an autonomous Petri net for parallel or conflicting activities. First, the input and output of each activity are specified, which are replaced by transition-place-transition structures. Each shared resource is represented by a place with a token. Activities with one input and one output for a lathe robot are considered.

The method proposed by (Kaisarlis, 2020) starts with the construction of a functional hierarchy diagram representing the material flow. Then another information flow diagram is constructed that controls the material flow. The two diagrams combined give a controllable diagram from which a connected Petri net is constructed.

In (Yaqiong, 2011), manufacturing systems are considered based on the arrow annotation of the SADT model. A Petri net is constructed from the SADT model using secondary nets corresponding to the elements of the SADT model. Each task in the SADT model is replaced by a Petri net consisting of two places and two transitions (Fig. 4). Initially, a place (i) is marked.

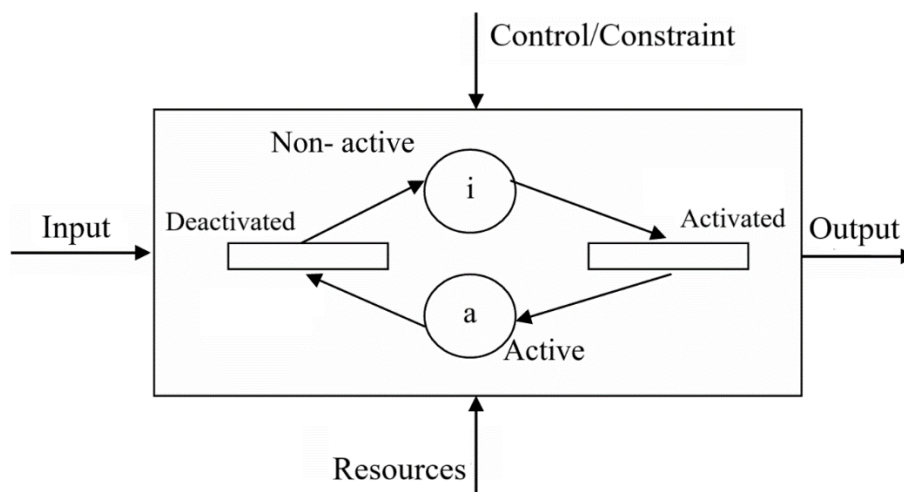


Fig. 4. SADT model in Petri net. Place (i) is «inactive», place (a) is «active»

Then, rules are defined for the flows (material, information, etc.), represented by the arrows of the SADT model. There are seven types of synchronization arrows – precedes, equals, meets, contains, begins, ends, drives. Fig.6. illustrates the principle for Shared resources are also modeled. Finally, arcs and transitions are added, which represent the external inputs and outputs of the SADT model.

In (Başak, 2015) a method for controlling a flexible manufacturing system is presented. A SADT model is used to study the system specifications. The interface is implemented by SADT/IDEF0 transformation rules in a Petri net.

The dynamics of activities are determined by two events: 1) triggering and 2) end of the activity and is modeled by a transition-place-transition structure. Only shared resources are modeled.

These methods are intended for production systems. They represent the sequence of activities and shared resources. Quality management is also based on the availability of resources specific to each activity, some of which are spent (finances, materials).

Given the above-mentioned features, this work proposes another method for moving from the IDEF0/SADT model to a Petri net model. It is based on the presented approaches, but integrates elements that take into account the specific aspects of the quality management system. The connection of Petri nets with different formalisms is also used, as well as the extension of Petri nets to add capabilities for hierarchical or structural modeling (Arronategui, 2024).

The first step defines each activity, as well as the inputs, outputs, controls and resources. Then the flow of information and material is defined by arrows. Special attention is paid to the additional elements necessary for the functioning of a quality management system: external control and consumables.

4. Application

A Petri Net as an Equivalent to an A0 Diagram in the SADT Model

To create a Petri Net, the SADT model from (Hu, 2020) is used, considering the SADT – A0 diagram. First, the meaning of each activity, inputs, outputs, controls and resources are defined. A distinction is made between information and material flows to facilitate the interpretation of the results obtained from the Petri Net simulation.

The Petri Net is constructed by representing the SADT activities as transitions. The interfaces between activities are defined by arrows and transformed by the Arrow-Place-Arrow structure. The transformation can be branching (Fig.5) or clustering (Fig. 6). The result is the Petri net structures.

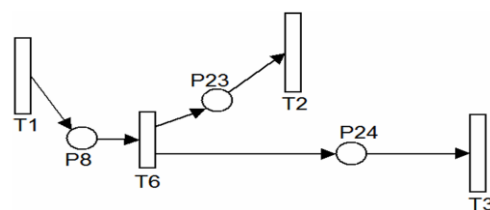


Fig. 5. Example of interface branching

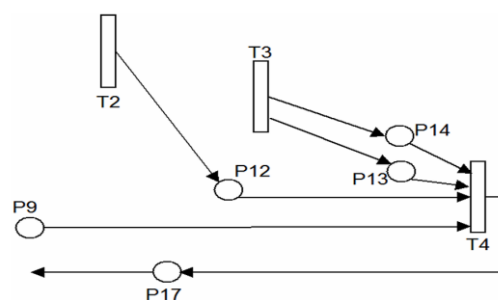


Fig. 6. Example of interface grouping

A good example of external control is Fig.7, which shows the transformation rule for this type of control.

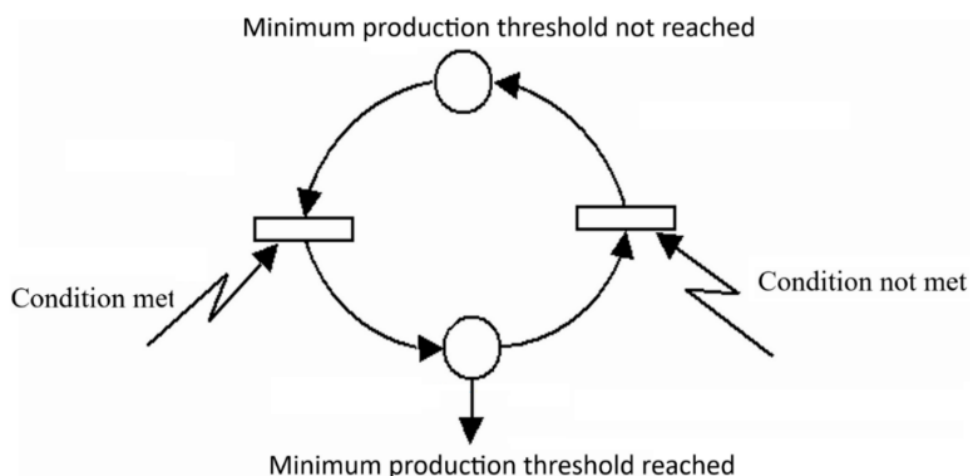


Fig. 7. External management - Reusable resources

There are reusable resources, consumable (budget) modeled with squares, unusable (damaged tools) modeled with transition. All subsequent steps are performed, reaching from the SADT model - diagram A0 to the equivalent Petri Net. Simulation of the resulting scheme gives the dynamic aspects for the SADT A0 diagram. Thus, blockages generated by errors in the system design or lack of resources can be detected.

The dynamic approach is built as a transition from a system based on the IDEF programming language to a Petri net. A new tool for modeling dynamic aspects based on the temporal technique for structural analysis and design (SADT) has been added.

5. Temporal SADT

The temporal SADT model is for studying the dynamic aspects of a modeled system by using interfaces to characterize data flows and temporal information.

The construction of a temporal SADT model is based on the following steps:

- Using an equation that uses the order of activation of activities to describe the different paths followed by the flows at each activation;
- Marking arrows describing the behavior of the activity. The type of each arrow in the SADT model is marked to explain the role of the different production flows. The arrow can be a material flow, or an information flow (data or event) for synchronization or inhibition;
- Using typed interfaces to characterize the production flows. There are two types of interfaces - explaining the rules for visualization and showing the graphical representation of the behavior of the activities.

To implement the temporal model of the A0 diagram of the SADT model, the activation equations are first described. Then the description of the behavior of the activities is presented. And finally the rules for implementing the A0 diagram of the temporal SADT model are applied.

6. Comparison between the SADT association - Petri net and the temporal SADT model

So far, two varieties of the SADT model have been described, with which to track the production and information flows by simulating the model. But the information flows are better defined in the temporal SADT model.

Furthermore, the SADT Petri Net tool is able to show the behavior between activities (Fig.8), which shows that the execution of the management network depends on the termination of the first network to perform maintenance actions.

- The SADT – Petri Net tool is more effective for modeling resources, especially shared resources, and can also indicate their availability.
- The distinction between inputs, controls, and time events is clearer in the temporal SADT model than in the SADT – Petri Net tool.
- For the simulation of temporal SADT, code is created in C++ or Smalltalk. On the other hand, there are several software programs for simulating Petri Nets.
- For optimization, an optimization algorithm must be created in both models.

Temporal SADT is an extension of the SADT model for modeling the dynamic behavior of a system. In this context, a scenario can be proposed for using both tools: SADT – Petri Net and temporal SADT together (Fig.9), which improves the results in modeling and using the system.

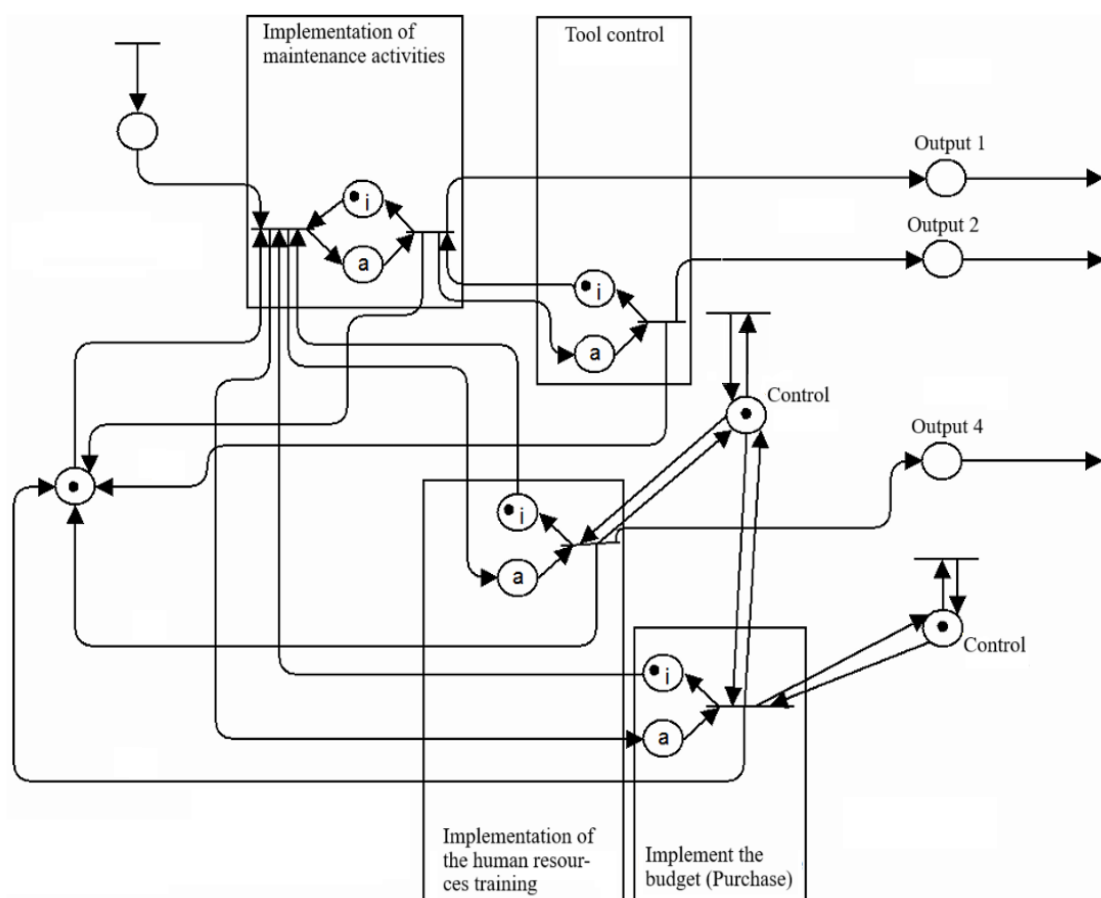


Fig.8. Behavior between activities

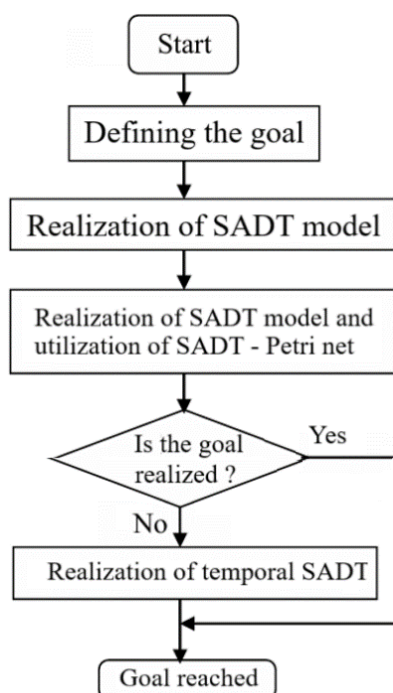


Fig. 9. Temporal SADT and SADT – Petri Net together

6. Conclusion

The paper presents a dynamic approach for analyzing the dynamic behavior of a quality management system in an automated production system, by transitioning from the IDEF0/SADT model to a Petri Net. The advantages of a Petri Net are indicated. The presented approach additionally takes into account the availability of resources for each activity separately, some of which are spent during the production process (finances, materials).

The transition from IDEF0/SADT to a Petri Net is described in detail, the rules used to achieve this transition are shown. A new time SADT tool is explained, which helps in modeling dynamic aspects. A comparison between the IDEF0/SADT tools – Petri Net and time SADT is proposed. A scenario for integrating the two tools is also proposed.

An integration of SADT and Petri Net is proposed. Thus, the ease of modeling with the SADT tool is combined with the power of modeling with a Petri Net. The goal is to identify possible shortcomings in the functioning of the system, as well as the adequacy of the allocated resources with the set goals.

REFERENCES

- Arronategui, U., Bañares, J., Colom, J. (2024). Large Scale System Design Aided by Modelling and DES Simulation: A Petri net Approach, *Software: Practice and Experience*. <https://doi.org/10.1002/spe.3374>
- Başak, Ö., Albayrak, Y. (2015). Petri net Based Decision System Modeling in Real-Time Scheduling and Control of Flexible Automotive Manufacturing Systems, *Computers & Industrial Engineering, Elsevier*, Vol. 86, pp. 116-126
- Diallo, O., Rodrigues, J., Sene, M. (2015). Performances Evaluation and Petri nets - Methodologies and Applications, *Chapter 11 in Modeling and Simulation*

- of Computer Networks and Systems, *ELSEVIER Science Direct*, pp. 313-355, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800887-4.00011-0>.
- Drighiciu, M. (2017). Hybrid Petri nets: a framework for hybrid systems modeling, *2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*, Iasi, Romania, pp. 020-025, doi: 10.1109/SIELMEN.2017.8123285
- Fakhredaie, A. (2015). Solving a redundancy allocation problem with repairable identical components using simulation method and genetic algorithm, *The Business & Management Review*, Vol. 6 Number 2, pp. 81-91, International Conference on Business & Economic Development, March 2015 NY, USA
- Gehlot, V. (2021). A tutorial introduction to colored petri nets framework for model-driven system design and engineering, *2021 Annual Modeling and Simulation Conference (ANNSIM)*, Fairfax, VA, USA, 19-22 July 2021. DOI: 10.23919/ANNSIM52504.2021.9552063
- Grobelna, I., Karatkevich, A. (2021). Challenges in application of petri nets in manufacturing systems. Review, *MDPI Electronics* 2021, 10, 2305, pp. 24
- Hu, L., Liu, Z., Hu, W., Wang, Y., Tan, J., Wu, F. (2020) Petri-net-based dynamic scheduling of flexible manufacturing system via deep reinforcement learning with graph convolutional network, *Journal of Manufacturing Systems*, Elsevier Vol. 55, April 2020, pp. 1-14.
- Kaisarlis, G., Vakouftsis, Ch., Mavridis-Tourgelis, A., Spitas, V. (2020). Effect of datum system and datum hierarchy on the design of functional components produced by additive manufacturing: a systematic review and analysis, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 111(3-4), November 2020. DOI:10.1007/s00170-020-06152-6
- Koziolek, H., Burger, A., Platenius-Mohr, M., Jetley, R. (2020). A classification framework for automated control code generation in industrial automation, *Journal of Systems and Software*, Vol. 166, August 2020, 110575, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110575>
- Lafortune, St. Discrete event systems: modeling, observation, and control, annual review of control, *Robotics, and Autonomous Systems*, Vol. 2:141-159, <https://doi.org/10.1146/annurev-control-053018-023659>
- Liu, G. (2022). Petri nets: theoretical models and analysis methods for concurrent systems, *Springer*, 2022.
- Yaqiong, Lv. (2011). RFID-based colored petri net applied for quality monitoring in manufacturing system, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 60(1-4), April 2011. DOI:10.1007/s00170-011-3568-z

Ch. Assist. Prof. Petar Marinov, PhD

Scopus ID: 59412194800

Technical University of Sofia

Sofia, Bulgaria

E-mail: pmarinovtusofia@gmail.com

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR INCREASING THE RELIABILITY OF PLATTER SKI LIFT FACILITIES

Aleksander Vukov

*Bulgarian Academy of Sciences,
Institute of Information and Communication Technologies, Bulgaria*

Milena Haralampieva

*Bulgarian Academy of Sciences,
Institute of Information and Communication Technologies, Bulgaria*

Rosen Petrov

*Bulgarian Academy of Sciences,
Institute of Information and Communication Technologies, Bulgaria*

Abstract. This paper explores common operational challenges in platter ski lifts, including mechanical failures, environmental influences, and user behavior effects, and highlights the importance of integrating advanced sensor technologies for real-time monitoring and predictive maintenance. The study examines various sensor types, including mechanical, optical, acoustic, and thermal sensors, which play a critical role in detecting misalignment, mechanical strain, temperature fluctuations, and structural defects. Additionally, the paper presents an innovative system utilizing mechanical tilt sensors, a control unit, and a light signaling board to monitor cable alignment, enhance skier awareness, and prevent misalignment-related failures. The proposed system improves lift safety, reduces mechanical wear, and optimizes maintenance strategies, ultimately increasing the efficiency and lifespan of platter ski lift facilities.

Keywords: platter ski lifts, sensor integration, cable alignment, predictive maintenance, real-time monitoring, lift system safety

1. Introduction

Platter ski lifts, also known as button lifts or platter pull lifts, are a widely used means of transportation in ski resorts, providing an efficient way for skiers and snowboarders to ascend slopes. Analogies have been drawn between ski lifts and various systems, including electrical circuits, to help explain their operational principles (Mogstad, 2020). These systems operate through a continuously moving overhead cable supported by a series of pylons, with individual platter mechanisms attached at regular intervals. Unlike aerial lifts such as chairlifts and gondolas, platform lifts maintain contact with the ground, requiring users to place the plate between their feet while maintaining balance on their skis or snowboards as they pull themselves up.

The mechanical structure of a platter ski lift consists of several key subsystems, each contributing to its operational reliability (Vukov, 2024). These include:

- **Drive Station.** The drive station serves as the primary power source of the system. It houses the main motor and gearbox, which generate the torque required to drive the cable. Additionally, it incorporates braking mechanisms that allow controlled stopping of the lift in emergencies. A speed regulation system is also present to adjust the velocity of the cable, ensuring safe operation under different loading conditions.

- **Return Station.** Located at the upper end of the lift, the return station is responsible for redirecting the cable to complete its continuous loop. It contains a return pulley, which facilitates smooth redirection of the cable with minimal friction. A counterweight-based tensioning system is also integrated to maintain optimal cable tension, preventing excessive sag or misalignment that could compromise the lift's functionality.
- **Cable System.** The cable is a fundamental component of the platter lift, providing the continuous loop necessary for skier transportation. Constructed from high-strength, wear-resistant steel, it is designed to withstand high mechanical stress and environmental conditions. The cable's flexibility and durability are crucial for maintaining long-term performance and reliability.
- **Support Pylons and Sheave Assemblies.** Throughout the lift's length, pylon-mounted sheave assemblies support and guide the cable. These sheaves minimize lateral displacement and reduce vibrations, contributing to the overall stability of the system. The height and spacing of the pylons are carefully engineered to maintain a consistent trajectory of the cable while compensating for terrain variations.
- **Detachable Platter Grips.** The platter grips are spring-loaded mechanisms that attach at predetermined intervals along the cable. They engage automatically when the skier grabs the lift and disengages at the unloading station, ensuring a smooth release. Their design must allow for controlled detachment to prevent abrupt stops or excessive strain on the cable (Fig. 1).



Fig. 1. Platter ski lift

Each of these subsystems plays a crucial role in the overall efficiency and reliability of platter ski lifts. A failure in any component can lead to operational disruptions, making regular maintenance and technological enhancements essential for long-term performance.

Platter lifts offer several operational advantages, including high transport capacity, relatively low energy consumption, and suitability for beginner and intermediate slopes. As ski resorts look for ways to enhance operational efficiency and reduce environmental impact, innovations in autonomous ropeways have become an important consideration. The next step for ski lift systems involves making better use of energy through advanced autonomous technologies. These innovations are increasingly viewed as a potential solution to improve energy efficiency and address some of the existing mechanical and operational challenges (Doppelmayr, 2023). However, their efficiency is affected by mechanical wear, dynamic loading conditions, and environmental influences such as ice accumulation, temperature fluctuations, and wind forces. Structural stress, resulting from continuous cyclic loading, can lead to damage in key components such as cable attachments, pulleys, and support structures. Additionally, external factors such as improper user handling and sudden variations in user load can induce additional forces that contribute to system failure.

To enhance reliability and minimize operational downtime, modern platter lift systems can benefit from advanced monitoring technologies. The integration of sensor-based diagnostics, including mechanical strain sensors, optical alignment detectors, and environmental monitoring systems, facilitates real-time condition assessment and predictive maintenance. Such innovations enable early fault detection, improving safety and extending the operational lifespan of these facilities.

2. Common Operational Challenges in Platter Ski Lifts

Platter ski lifts, while efficient and widely utilized in ski resorts, are subject to various operational inefficiencies arising from mechanical degradation, environmental exposure, and user-induced disturbances. These challenges necessitate maintenance protocols and the integration of advanced monitoring techniques to ensure continuous functionality and safety. Some of the most common failures are:

2.1. Mechanical Failures

Mechanical failures in platter ski lifts primarily stem from cable misalignment, wear of material, drive system inefficiencies, structural stress on pylons and sheave assemblies, and platter grip malfunctions. The cable system, as the primary load-bearing component, undergoes continuous cyclic loading and environmental stressors, leading to gradual misalignment and amortization that compromise the dynamic stability of platter grips and overall system reliability. Drive system inefficiencies arise from deterioration of engine performance due to thermal stress and electrical fluctuations, gearbox wear resulting in suboptimal torque transmission, and braking system inconsistencies that increase the risk of uncontrolled movement (Ewald, 2023). Moreover, the structural strain on pylons and sheave assemblies, resulting from bearing wear and loosened fasteners, intensifies vibrational instabilities and uneven tension distribution, hastening cable wear. Platter grip malfunctions, including elastic component wear, surface wear, and impact loading effects, further contribute to unintended detachment and potential safety hazards (Fig. 2).

These mechanical challenges require the implementation of proactive maintenance measures and continuous monitoring to uphold lift efficiency and prevent operational interruptions.



Fig. 2. Ski lift rubber seal wear

2.2. Impact of Environmental Conditions on Lift Performance and Stability

Platter ski lifts are prone to environmental stressors that significantly impact operational performance and structural integrity. Frost formation on cables and support structures increases the overall mass and tensile stress, potentially leading to deformations that compromise stability, while excessive snow accumulation obstructs critical mechanical components, necessitating frequent de-icing and clearance efforts. Thermal fluctuations further contribute to material expansion and contraction cycles, causing progressive misalignment of structural elements and altering the lubricant viscosity, which affects gearbox and bearing efficiency. Additionally, strong winds impose fluctuating lateral loads on the cable system, leading to oscillatory instabilities and deviations in lift trajectory, which may compromise user safety and system efficiency (Fig. 3). These environmental factors necessitate robust structural designs, real-time monitoring mechanisms, and adaptive operational strategies to lower adverse effects and ensure continuous functionality.

2.3. Impact of User Behavior on Lift Stability and Performance

Different user behaviors create significant challenges for the stability and efficiency of platter ski lifts, primarily due to inconsistencies in load distribution and interaction with the lift system. Differences in skier weight and sudden loading changes generate transient forces, causing localized stress concentrations on the cable and increasing mechanical strain on platter grips, which can accelerate material wear and reduce system longevity. Inexperienced skiers might not use the lift smoothly, applying uneven or sudden forces that disturb the lift's motion (Fig. 4).



Fig. 3. Ski lift frost formation (Snowbowl)



Fig. 4. Platter ski lift usage

This may cause the lift to vibrate or shake, which creates further issues. To make sure the lift works well and safely, the system needs to be designed to handle different kinds of user behavior. It also helps to provide better instructions to users and use technology to monitor the system in real-time to catch and adjust for any irregular movements or forces.

2.4. Advanced Monitoring and Preventative Maintenance

To address operational limitations, modern platter ski lift systems must integrate advanced technologies such as structural health monitoring (SHM) systems, including strain gauge sensors for real-time stress analysis, and environmental sensing arrays that enable predictive frost formation management and aerodynamic stability assessments. Additionally, automated diagnostic tools utilizing machine learning algorithms can detect abnormal vibration trends that signal potential mechanical failures, while user interaction modeling allows for the predictive adaptation of engagement mechanisms based on skier proficiency levels (Abro, 2024). By applying these scientific methods, ski resorts can improve lift reliability, optimize maintenance schedules, and ensure the ongoing safety and efficiency of platter ski lift systems.

3. Advanced Sensor Integration for Ski Lift Monitoring and Safety

The integration of advanced sensor technologies into ski lift systems has significantly enhanced operational efficiency, safety, and predictive maintenance capabilities. Sensors are crucial for real-time monitoring and the early detection of issues that could compromise the functionality and safety of the lift systems (Dichev, 2024). Various sensor types are utilized to assess different mechanical, environmental, and system aspects. For instance, Lin et al. (2022) developed a safety training monitoring system for ski resorts based on wireless sensor networks, highlighting the potential of sensor technologies in enhancing safety measures in ski-related environments (Lin, 2022).

3.1. Mechanical Sensors:

Mechanical sensors are designed to measure the physical changes that occur within a material or structure due to applied forces, pressure, or strain.

These sensors include strain gauges, pressure sensors, and load sensors, which are commonly used in ski lift systems to monitor the condition of key components.

Strain gauges measure the deformation or strain in a material, providing critical data on the stress that structural elements like cables, pylons, and lift grips are subjected to. Pressure sensors, on the other hand, detect changes in force or pressure within hydraulic or pneumatic systems, while load sensors measure the weight or force applied to various components, ensuring even load distribution and preventing overloading. Mechanical sensors are of great importance for identifying potential system failures or wear before they lead to significant damage, thus providing the ongoing reliability and safety of ski lifts.

Mechanical sensors, integrating these technologies into IoT-based predictive monitoring systems offer a comprehensive approach to predictive maintenance (Narayana, 2024). IoT systems enable real-time, continuous monitoring of ski lift operations and related infrastructure. This allows for early identification of potential failures in critical components, ensuring that maintenance is carried out in a timely manner, reducing downtime and maintenance costs (Gorin, 2022).

3.2. Optical Sensors:

Optical sensors operate by using light—typically infrared or laser beams—to detect objects, measure distances, and monitor various system conditions without physical contact. Laser sensors are particularly effective in measuring the alignment of cables and detecting misalignment issues, while infrared sensors are used for temperature monitoring and detecting anomalies such as frost formation on cables and components. Optical flow sensors track the movement of objects and components, offering valuable data on the dynamic behavior of the lift system, including the alignment and stability of platter grips and cables. These sensors are suitable because they offer non-contact measurements, reducing wear and tear on equipment while enabling precise monitoring of both mechanical and environmental conditions.

3.3. Acoustic Sensors:

Acoustic sensors utilize sound waves to detect mechanical irregularities or environmental changes, making them valuable for diagnosing potential issues in ski lift systems. Ultrasonic sensors send high-frequency sound waves through materials, helping to identify sub-surface defects like cracks or corrosion in structural components such as cables, pylons, and sheave assemblies. Sound/vibration sensors are sensitive to the sounds or vibrations produced by machinery and can detect irregularities like bearing failures or imbalances in the system. By monitoring changes in the normal acoustic pattern of mechanical components, acoustic sensors enable early detection of problems that could lead to system malfunctions, allowing for timely maintenance and repairs. These sensors play an essential role in ensuring the smooth operation of ski lifts and preventing unexpected failures.

3.4. Thermal Sensors:

Thermal sensors are used to measure temperature variations within a system, and they are crucial for detecting issues related to overheating, material amortization, and environmental changes. Infrared sensors provide a non-contact method of measuring temperature and can detect hot spots in components like motors, gearboxes, and electrical systems, which might indicate potential failures.

Thermocouples and thermistors are more precise temperature sensors that are commonly used in systems requiring accurate temperature measurements. Thermocouples work by generating a voltage in response to temperature differences, while thermistors change resistance as temperature fluctuates, allowing for the detection of temperature changes in specific components.

Thermal sensors are important for monitoring the functional integrity of ski lift systems, ensuring that components do not overheat, which could lead to system failures or safety risks.

4. Implementation of Sensor Technologies to Improve the Operation of Platter Ski Lift Facilities

The proposed system for monitoring and maintaining cable alignment in platter ski lifts consists of three essential components: mechanical tilt sensors, a control unit, and a light signaling board. These components collaborate effectively to detect any deviations in cable alignment in real time, ensuring that immediate corrective actions can be taken to prevent misalignment from progressing and to optimize system performance (Caves, 2024). Mechanical tilt sensors are the ideal choice for this application due to their high precision in detecting angular shifts. These sensors utilize internal pendulum mechanisms or MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) technology, which are capable of accurately measuring the angle of displacement (Fig. 5).

By continuously tracking the cable's position, the sensors provide valuable data that the control unit processes in real time to determine whether the cable remains within the acceptable alignment limits. This data is crucial in ensuring the lift system responds promptly to any deviations.

When the system detects a deviation in the range of 8-10 degrees of cable position, it triggers the light signaling board, which displays a red arrow indicating the direction of the misalignment. Similar signaling technologies, such as the TWS (Tower Warning Signal) stack light system deployed at a ski resort in the Dolomites, also contribute to improving safety by managing access and signaling critical information to users (Sirena, 2024). The left-pointing red arrow is activated when the cable deviates to the left, while the right-pointing red arrow appears when the deviation occurs to the right. This visual indicator helps the skier immediately recognize which direction they need to adjust their position to correct the misalignment. By providing these directional signals, the system helps ensure that skiers can stay properly positioned and prevent further disturbances in the lift's operation.

If the misalignment worsens and the cable deviates by 12 degrees or more, the system escalates the response to ensure the safety and stability of the lift. In this case, a red "X" indicator is activated on the light signaling board to indicate that the deviation is critical. This indicator acts as a clear and unmistakable signal of a serious misalignment that requires prompt attention (Fig. 6).

At this stage, additional safety measures may be automatically triggered by the system. These could include speed adjustments to reduce the strain on the lift system, as the cable's misalignment could cause increased mechanical wear and stress. Short-term pauses of the lift may also be implemented to prevent the misalignment from worsening, potentially causing more damage to the system or creating safety hazards for users.

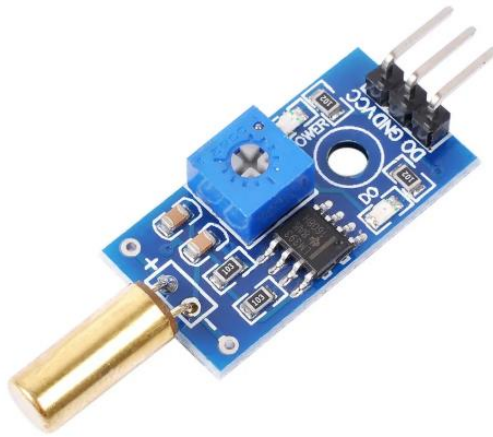


Fig. 5. Mechanical tilt sensor

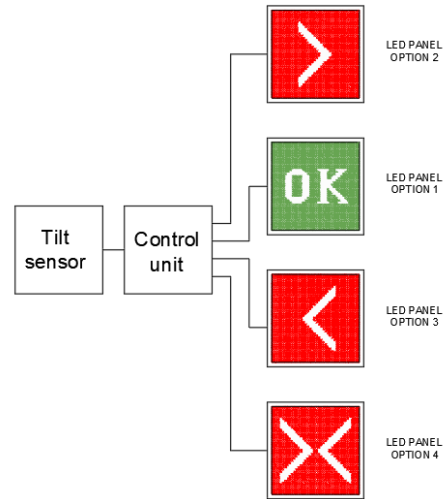


Fig. 6. Control panel with light signalization

For optimal sensor performance, mechanical tilt sensors need to be placed in locations where they can most effectively detect misalignments as they occur. The most suitable placement for these sensors is immediately after the sheave assemblies (Fig. 7).

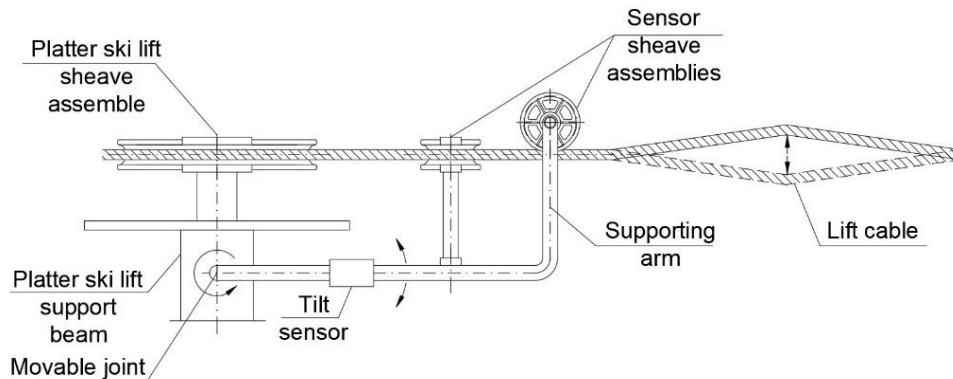


Fig. 7. Platter ski lift control system with Tilt sensor

This area is critical because it is where the cable experiences the greatest tension and movement, which makes it the most sensitive zone for detecting any angular deviations. The sheaves have a key function in guiding and supporting the cable as it moves along the lift, and any misalignment that occurs at this point can have a significant impact on the overall operation of the system. Placing the sensors here ensures that any cable deviations are detected as soon as they occur, allowing for prompt corrective action before the misalignment extends further along the lift. By catching these issues early, the system can prevent the cable from deviating too far and causing more serious problems down the line. These sensors should be securely mounted on a stable structure to prevent false readings by external factors such as vibrations, wind, or environmental disturbances. Such stability is crucial in providing reliable data that will guide the system's corrective actions effectively.

The combination of mechanical tilt sensors, real-time data processing, and a visual signaling board makes this system an efficient and effective solution for monitoring and correcting cable alignment in platter ski lifts. The precise sensor placement and immediate response mechanisms ensure that misalignments are addressed as soon as they are detected, thereby maintaining smooth lift operation, enhancing safety, and extending the longevity of the lift system by reducing mechanical wear caused by improper alignment.

Integrating this system into platter ski lift operations offers several advantages:

- **Enhanced Safety:** Real-time monitoring and early warning signals (like red arrows) help prevent accidents by alerting skiers to misalignments and triggering automatic safety responses when critical rates are exceeded.
- **Reduced Mechanical Wear and Tear:** Early detection of misalignments minimizes stress on the cable and other mechanical components, extending their lifespan and reducing the need for frequent maintenance.
- **Improved Operational Efficiency:** The system ensures smoother lift operation by maintaining proper cable alignment, reducing downtime and energy consumption, and enhancing overall performance.
- **Increased Longevity of the Lift System:** By preventing damage and excessive strain, the system helps prolong the lifespan of key components such as cables, motors, and sheaves, leading to cost savings on repairs and replacements.
- **Better User Experience:** With visual cues (green and red lights), skiers can adjust their positioning, ensuring a smoother, more reliable ride, which enhances their overall experience.
- **Real-Time Performance Monitoring:** Continuous real-time data collection enables operators to monitor lift performance, identify potential issues early, and optimize maintenance schedules, leading to improved system management.

5. Future steps

One of the main consumables of this type of lift is Ski lift rubber seal wear. Research is planned to establish a more accurate time for changing the Ski lift rubber seal wear in order to avoid unwanted stops and increase the operational reliability of the ski lift. This would lead to better experiences for skiers, reduce unexpected waits, and increase the user experience. For future research, it is assumed to use non-destructive methods such as 3D scanning using laser scanners, which can contribute to a proper comparison model (Paneva, 2023).

6. Conclusion

The integration of mechanical tilt sensors in platter ski lift facilities is essential for enhancing safety, operational efficiency, and equipment longevity. By implementing precision sensors to monitor cable alignment in real-time, ski resorts can proactively detect deviations, prevent mechanical strain, and optimize the maintenance process. The real-time data provided by these sensors enables immediate corrective actions, reducing the risk of malfunctions and ensuring continuous safe operation for skiers.

The system's visual indicators guide skiers to adjust their positioning, improving user compliance and further enhancing ride stability. As sensor technology continues to advance, the integration of such systems will play a pivotal role in transforming ski lift operations and setting new standards for reliability, safety, and sustainability. These innovations will ensure that platter ski lifts operate efficiently in dynamic winter environments, providing a smoother and safer experience for skiers while extending the life of the lift system.

REFERENCES

- Abro, G. E. M., Ali, A., Memon, S. A., Memon, T. D., Khan, F. (2024). Strategies and challenges for unmanned aerial vehicle-based continuous inspection and predictive maintenance of solar modules, *IEEE Access*, vol. 12, pp. 56789-56805, Nov. 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3505754
- Caves, E. M., Davis, A. L., Nowicki, S., Johnsen, S. (2024). Backgrounds and the evolution of visual signals. *Trends in Ecology & Evolution*, 39(2), 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.09.006>
- Dichev, D., Zhelezarov, I., Georgiev B., Pulov, D., Kovachev, H., Malakov, I. (2024). Analysis of Errors in Roll and Pitch Measurements for Moving Objects, *2024 XXXIV International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*, Sozopol, Bulgaria, pp. 1-6, doi: 10.1109/MMA62616.2024.10817660
- Dichev, D.; Zhelezarov, I.; Georgiev B.; Hasanov, H.; Libchev, K.; Kupriyanov, O.; Malakov, I.; Dicheva, R. (2024). Improving the Accuracy of Systems for Measuring the Angular Position of Moving Objects with an Adaptive Wiener Filter, *2024 XXXIV International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*, Sozopol, Bulgaria, pp. 1-5, doi: 10.1109/MMA62616.2024.10817671
- Doppelmayr, (2023). Next step for autonomous ropeways: Making better use of energy, Available: https://www.doppelmayr.com/wpcontent/uploads/2023/06/DM_UP217_Messeausgabe_ENG_230517_WEB.pdf.
- Ewald V. (2023). AI-assisted design & optimization for predictive maintenance: A case study using deep learning and search metaheuristics for structural health monitoring in aviation, *Doctoral thesis, Delft University of Technology*, [Online]. Available: <https://doi.org/10.4233/uuid:a3070931-7512-44fa-833e-4fdc9e33da4a>
- Gorin, A., Paolo, R. (2022). IoT Safety Predictive Monitoring of Lift Operations, Shafts, and Buildings." *Elevator World*, <https://www.elevatorworld.com/article/iot-safety-predictive-monitoring-of-lift-operations-shafts-and-buildings/>
- Lin, Z., Fu, Y., Deng, X. (2022). Safety Training Monitoring System of Ski Resort Based on Wireless Sensor Network. *Wireless Communications and Mobile Computing*, Article ID 6355567. <https://doi.org/10.1155/2022/6355567>
- Mogstad, E., Bungum, B. (2020). Ski lifts, bowling balls, pipe system or waterfall? Lower secondary students' understanding of analogies for electric circuits, *Nordic Studies in Science Education*, vol. 16, no. 1, pp. 37–51, DOI: 10.5617/nordina.6882
- Narayana, T. L.; Venkatesh, C.; Kiran, A., J. C. B.; Kumar, A.; Khan, S. B., Almusharraf, A., Quasim, M. T. (2024). Advances in real-time smart monitoring of

- environmental parameters using IoT and sensors. *Heliyon*, 10(7), e28195. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28195>
- Paneva, M., Panev, P., Stoimenov, N., Gyoshev, S. (2023). Methodology for 3D scanning of objects, 2023 International Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Fluid Mechanics, Heat and Mass Transfer (MECHANICA 2023), Journal: WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, vol. 18, ISSN: 1991-8747, pp. 216-220, 2023
- Sirena, (2024). Case study: efficiency and safety at a ski resort. October 9. Retrieved from <https://www.sirena.it/en/case-study-ski-resort/>
- Snowbowl, Winter storm recovery operations. Available: <https://www.snowbowl.ski/winter-storm-recovery-operations/>
- Vukov, A., Paneva, M. (2024). Classification of ground ropeways lines. *XXXIII International Scientific and Technical Conference, ADP - 2024, 6, Publishing house of TU-Sofia*, ISSN:2682-9584, 139-142

Aleksander Vukov

Bulgarian Academy of Sciences,
Institute of Information and Communication Technologies, Bulgaria
Sofia, Bulgaria

Milena Haralampieva

Scopus ID: 57222150879
Bulgarian Academy of Sciences,
Institute of Information and Communication Technologies, Bulgaria
Sofia, Bulgaria
E-mail: milena_biserova@abv.bg

Rosen Petrov

Scopus ID: 57218380584
Bulgarian Academy of Sciences,
Institute of Information and Communication Technologies, Bulgaria
Sofia, Bulgaria
E-mail: rosen_p@yahoo.com



DIGITAL TWINS FOR THREAT SIMULATION AND INTELLIGENT DEFENSE STRATEGIES IN AUTOMATED DISCRETE MANUFACTURING

Roumiana Ilieva

Technical University of Sofia, Bulgaria

Gloria Stoilova

Technical University of Sofia, Bulgaria

Abstract. The rapid advancements in Industry 4.0 have led to the widespread use of Cyber-Physical Systems (CPS) in automated discrete manufacturing, resulting in improved efficiency, adaptability, and connectivity. However, the increasing digitalization of manufacturing environments also introduces significant cybersecurity vulnerabilities, highlighting the need for urgent and effective strategies to mitigate these threats. Digital Twin (DT) technology emerges as a promising solution, enabling real-time simulation of cyber threats and the development of intelligent defense mechanisms. This paper examines the crucial role of digital twins in enhancing cybersecurity within discrete manufacturing, specifically focusing on areas such as threat modeling, anomaly detection, and predictive defense strategies. The study also discusses the major challenges of implementing digital transformation (DT) and outlines future research directions to strengthen cybersecurity resilience in innovative manufacturing settings. It emphasizes the urgent need to address cybersecurity vulnerabilities and raise awareness about this critical issue among stakeholders.

Keywords: Digital Twins, Threat Simulation, Automated Discrete Manufacturing, Real-Time Monitoring, Cyber-Threat Modeling

1. Introduction

The convergence of industrial automation and digital technologies has redefined the landscape of modern manufacturing. Integrating CPS into discrete manufacturing processes enabled unprecedented operation efficiency and automation. Still, the interconnected ecosystems are susceptible to cyber threats, which can disrupt production, compromise data integrity, and result in significant financial losses (XS Web Design, 2024). Traditional cybersecurity solutions often exhibit limitations in proactively identifying and mitigating evolving threats. In this context, Digital Twin technology has gathered increasing attention for its potential to enhance cybersecurity resilience. By replicating physical assets and processes in a virtual environment, DTs provide a dynamic framework for real-time monitoring, threat simulation, and adaptive defense strategies.

2. The Role of Digital Twins in Manufacturing Cybersecurity

A Digital Twin is a digital replica of a physical system continuously synchronizes with its real-world counterpart through real-time data acquisition. In manufacturing cybersecurity, DTs are proactive tools for analyzing system vulnerabilities, detecting anomalies, and developing strategic countermeasures (Tekinerdogan, 2020). Digital Twins facilitates a comprehensive understanding of the cyber-physical threat landscape by leveraging sensor data, machine learning algorithms, and predictive analytics. This capability enables manufacturers to anticipate, simulate, and respond to potential cyber incidents before they materialize, enhancing system resilience and operational continuity.

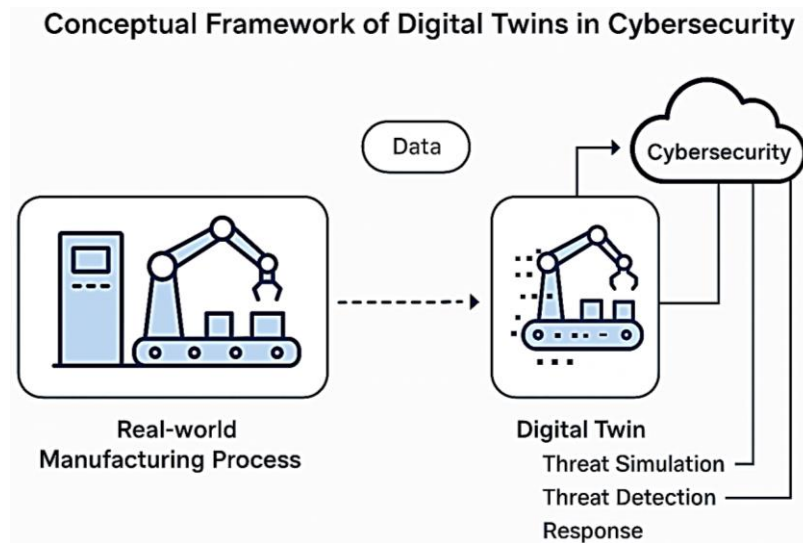


Fig. 1. Illustration of Conceptual Framework of Digital Twins in Cybersecurity for Discrete Manufacturing

3. Digital Twin-Based Threat Simulation and Detection

The ability to simulate and analyze cyber threats within a controlled virtual environment is considered one of the fundamental applications of DTs in cybersecurity. By mirroring the behavior of production assets and networks, DTs allow for executing simulated attack scenarios to assess vulnerabilities and response strategies. For instance, studies have demonstrated the effectiveness of DT-based testbeds in replicating various attack vectors, including denial-of-service (DoS) attacks, unauthorized access attempts, and ransomware incidents. The generated threat intelligence can be utilized to train advanced machine learning (ML) models capable of identifying abnormal patterns and classifying security threats with high precision. Moreover, DTs enable the establishment of self-adaptive security protocols that dynamically adjust to emerging threats, thereby mitigating potential disruptions in real-time. DTs facilitate cybersecurity through a structured process of threat simulation and detection. The threat simulation workflow involves the following stages shown in table I. The following flowchart details the process of cyber threat simulation using Digital Twins, illustrating the sequential stages from data acquisition to response and mitigation.

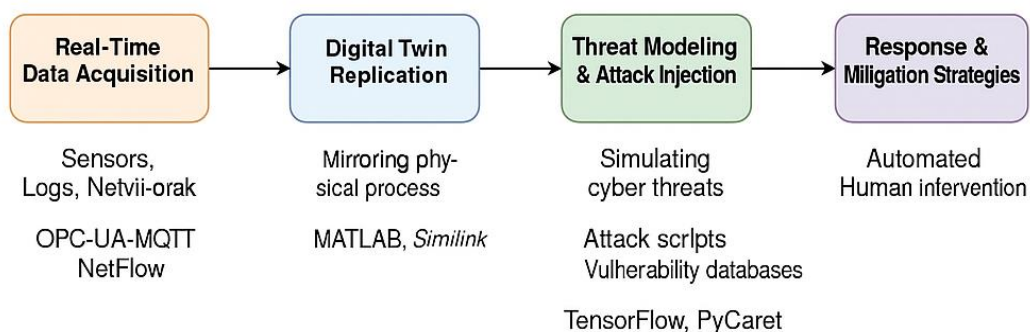


Fig. 2. Illustration of the workflow for cyber threat simulation using Digital Twins, detailing the sequential stages from data acquisition to response and mitigation

Table I. Stages of the threat simulation workflow

Stage	Description
1.	<u>Real-Time Data Acquisition:</u> - Collecting data from IoT devices, industrial machines, PLCs, and network logs. - Network traffic is continuously monitored using deep packet inspection tools to detect abnormal communication patterns - Logs from Sec Information Event Management (SIEM) systems are aggregated for historical analysis.
2.	<u>Digital Twin Replication:</u> Synchronizing the virtual model with real-world processes. - The DT mirrors the manufacturing process in a high-fidelity simulation environment - AI-Driven predictive models, including neural networks and Bayesian interface, are used to synchronize virtual and real-world behaviors in near real-time. - Block-chain-based integrity verification ensures that DT states remain untampered.
3.	<u>Threat Modelling & Attack Injection:</u> Simulating potential cyberattacks. - Potential attack vectors are modelled using framework. - Adversarial simulations include ransomware deployment, MitM attacks, and insider threat scenarios. - Attack injection tools simulate real-world cyberattacks on the DT environment and analyze system resilience.
4.	<u>Anomaly Detection & Risk Assessment:</u> Using AI-driven analytics to identify deviations from normal system behavior. - AI/ML-based anomaly detection models analyze deviations from normal behavior using algorithms - Risk assessment is conducted using the Common Vulnerability Scoring System (CVSS) to classify threats based on impact and exploitability - An event-driven cybersecurity dashboard provides real-time visualization of detected threat and risk levels
5.	<u>Response & Mitigation Strategies:</u> Implementing automated or human-assisted security measures. - Automated firewall rule adjustments and Intrusion Prevention System (IPS) updates are deployed in response to detected threats. - AI-driven adaptive security policies, utilizing reinforcement learning, continuously optimize defense mechanisms. - Cybersecurity incident reports are generated, logging attack details and system responses for forensic analysis and future improvements.

4. Intelligent Defense Strategies through Digital Twins

Digital twins (DTs) are crucial in developing intelligent defense mechanisms for manufacturing cybersecurity, going beyond just threat simulation. The continuous data streams generated by DTs offer valuable insights into system behavior, which help detect anomalies through AI-driven analytics. Advanced deep learning techniques, such as recurrent neural networks (RNNs) and convolutional neural networks (CNNs), can be integrated into DT frameworks to enhance intrusion detection capabilities. Furthermore, DT-enabled cybersecurity systems can dynamically utilize reinforcement learning to improve defensive strategies based on evolving threat patterns. This adaptive approach ensures that security measures remain effective against sophisticated cyber adversaries, ultimately strengthening the cybersecurity posture of automated manufacturing environments. In the context of the definition of Digital Twins, we see a wide range of applications, uses, and added benefits for DT in any production or manufacturing system compared to traditional models.

The division is in two categories – the first encompasses operational applications of DTs to monitor and control systems and detect anomalies. The second category includes tactical/strategic applications such as scenario studies, training, incident simulation, and system design.

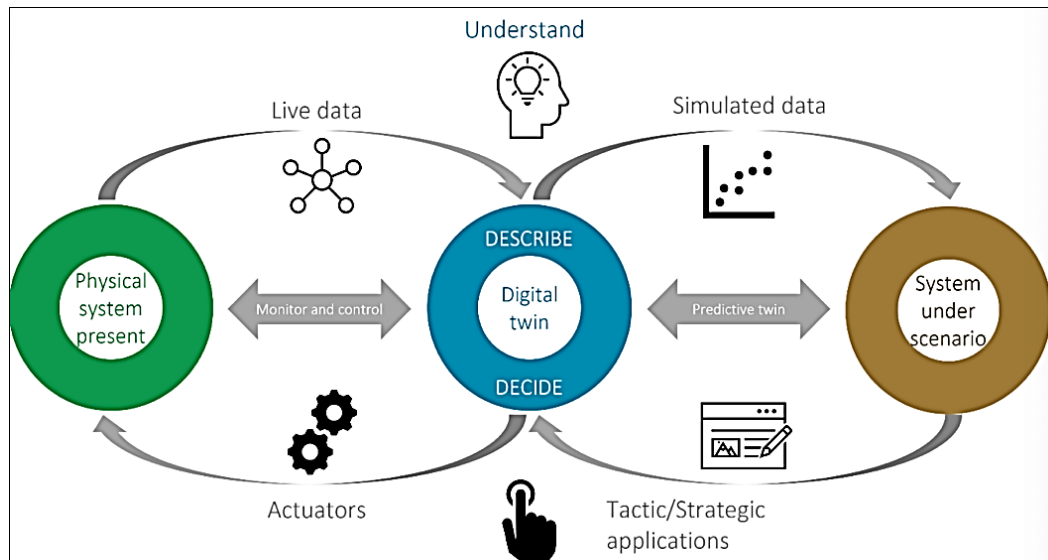


Fig. 3. Digital twin, with the left side representing operational applications (what it is now) and the strategic application (what if and future scenarios) on the right side

A multi-layered approach is employed:

Table II. Layers and components/functions integrating with AI models

Layer	Components/Functions
Physical Layer	Interconnected machines, IoT sensors, and controllers.
Digital Twin Layer	Virtual model with real-time synchronization.
AI & Analytics Layer	Machine learning models for anomaly detection and predictive analytics.
Defense Layer	Automated responses, adaptive firewalls, and security orchestration.

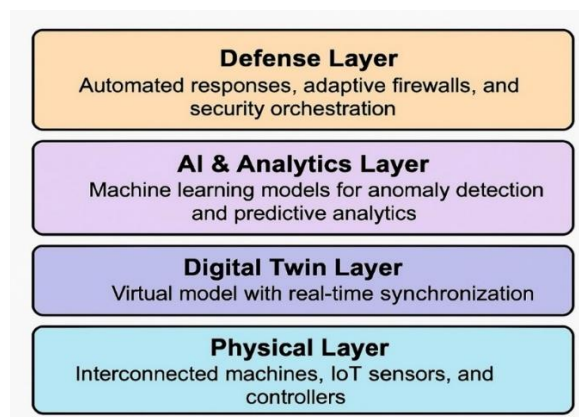


Fig. 4. Layers and components/functions integrating with AI models

The diagram below illustrates the WF in a loop and how DTs integrate with AI models in the AI & Analytics Layer to enable real-time threat detection and autonomous security responses in manufacturing environments.

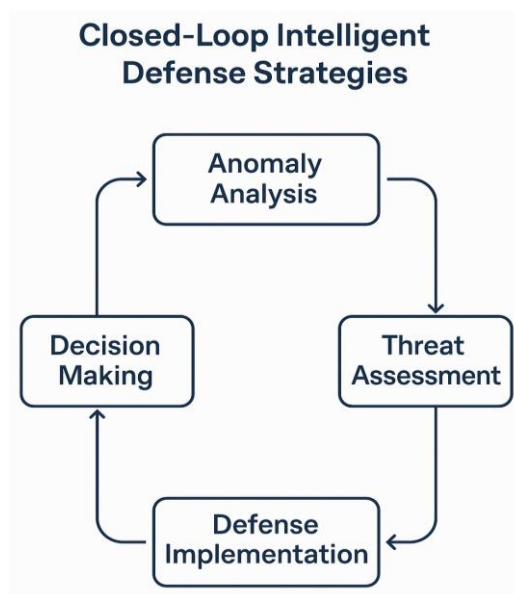


Fig. 5. Flow diagram of closed-loop intelligent defense strategies

5. Case Study: Digital Twin Implementation in Discrete Manufacturing

To illustrate the practical implications of DTs in cybersecurity, we shall demonstrate the practical implications of Digital Twins (DTs) in cybersecurity; let us consider an automated discrete manufacturing facility where programmable logic controllers (PLCs) manage production processes (Jiang, 2024). By implementing DTs, real-time operational data from PLCs can be continuously monitored and analyzed for any deviations from expected behavior. In an anomaly—such as an unauthorized configuration change or an unusual command sequence—the DT system can activate an automated response to isolate the affected component, initiate a forensic analysis, and prevent potential cyber incidents. This real-time anomaly detection and response capability dramatically enhances the resilience of manufacturing infrastructures against cyber threats. This case study examines an automated discrete manufacturing facility specializing in high-precision industrial robotics.

The increasing reliance on Cyber-Physical Systems (CPS) in this domain has introduced vulnerabilities, necessitating an advanced cybersecurity approach. Digital Twins were deployed to enhance threat detection, operational resilience, and response automation. The diagram below illustrates the stages of applying Digital Twins for real-time monitoring and anomaly detection in an automated discrete manufacturing environment. It outlines the data flow from PLCs to the Digital Twin system, enabling proactive threat detection and mitigation.

The Digital Twin was used to simulate multiple cyberattack scenarios. For instance, different threat types scenarios in a DL are described in Table 3.

In this simulated test scenario, we incorporate parts of different actual test cases (Tayouri, 2023), (Varghese, 2022). For example, a simulated Denial-of-Service (DoS) attack on the facility's IoT-enabled production line resulted in significant delays.

Cybersecurity Case Study in
Automated Discrete Manufacturing

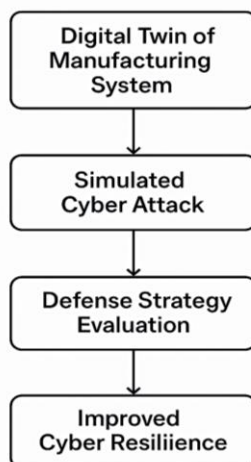


Fig. 6. Cybersecurity Case Study: Digital Twin Implementation in Discrete Manufacturing

Table III. Different threat types scenarios in a DL

Threat Type	Description
Denial-of-Service (DoS) attacks	Overloading network infrastructure to disrupt communication.
Ransomware attacks	Encrypting critical production files to halt operations.
Insider Threats	Unauthorized access to PLCs and unauthorized command execution.
Supply Chain Attacks	Introducing vulnerabilities through compromised software updates.

The AI-driven anomaly detection system flagged the unexpected traffic surge, triggering an automated mitigation response, thereby preventing real-world production downtime. The DL autonomously adjusts firewall configurations through integration with AI-driven models in response to detected anomalies; using reinforcement learning, the system refined its threat identification capabilities, reducing false positives by 18 over 6 months. A set of performance metrics was used to assess the effectiveness of the DL implementation:

Table IV. Cyber threat detection performance metrics:

Cyber Threat	Detected by Digital Twin?	Response Time	Real-World Impact Mitigated?
Ransomware Attack	☑ Yes	5 seconds	🔒 Data encryption prevented
DoS Attack	☑ Yes	8 seconds	🌐 Network stabilized before impact
Insider Threat	⚠ Partial	12 seconds	🚫 Unauthorized access blocked

The cited studies present empirical evidence and detailed methodologies for applying Digital Twins for cybersecurity in manufacturing environments, closely aligning with the context of this simulated case study.

While the Digital Twin-based cybersecurity framework demonstrated significant improvements in threat detection and response time, further research is required to enhance its adaptability to zero-day exploits. Future implementations should explore:

- Integration of Blockchain for immutable data integrity.
- Federated Learning Models to improve security intelligence across multiple manufacturing sites.
- Standardized cybersecurity protocols for Digital Twins in industrial settings.

6. Challenges and Future Research Directions

Despite their transformative potential, the deployment of DTs in cybersecurity for discrete manufacturing is accompanied by several challenges:

Table V. List of description of main challenge areas in DTs

Challenge Area	Description
Data Integrity and Authenticity	Ensuring accuracy, consistency, and authenticity of real-time data used by DTs.
Computational and Integration Complexities	Addressing high computational demands and seamless integration with existing architectures.
Standardization and Regulatory Compliance	Establishing industry-wide protocols and compliance mechanisms for DT-based cybersecurity solutions.

Future research should explore how DTs can adapt to evolving cyber threats through self-learning algorithms and decentralized security architecture and refining DT-driven cybersecurity methodologies by integrating blockchain for tamper-proof data management, enhancing AI-driven anomaly detection models, and developing self-healing security architectures. Additionally, interdisciplinary collaborations between cybersecurity experts, industrial engineers, and AI researchers will be crucial in advancing the effectiveness and adoption of DTs in manufacturing cybersecurity.

7. Conclusion

Digital Twins represent a paradigm shift in cybersecurity strategies for automated discrete manufacturing, offering proactive and intelligent solutions for threat detection, simulation, and mitigation. By enabling real-time risk assessment and adaptive defense mechanisms, DTs enhance the security resilience of industrial infrastructures against emerging cyber threats. As the manufacturing sector continues to evolve toward greater digitalization, the strategic adoption of DT technology will play a pivotal role in safeguarding critical industrial assets. Future research should prioritize the optimization of DT frameworks, integrating advanced AI models, and establishing standardized security protocols to ensure the widespread implementation of DT-based cybersecurity solutions in Industry 4.0 environments.

Acknowledgment

The authors thank the Research and Development Sector at the Technical University of Sofia for the financial support.

REFERENCES

- Jiang, Y., et al. (2024). Leveraging Digital Twin Technology for Enhanced Cybersecurity in Cyber-Physical Production Systems. *Future Internet*, 16(4), 134. <https://doi.org/10.3390/fi16040134>

- How to Prioritize Cybersecurity in a Digital World, XS Web Design. (2024). <https://www.xswebdesign.com/how-to-prioritize-cybersecurity/>
- Su, S., et al. (2023). Investigation and Optimization of EOR Screening by Implementing Machine Learning Algorithms. *Applied Sciences*, 13(22), 12267.
- Tayouri, D., et al. (2023). A survey of MulVAL extensions and their attack scenarios coverage. *IEEE Access*, 11, 27974-27991.
- Tekinerdogan, B., & Verdouw, C. (2020). Systems Architecture Design Pattern Catalog for Developing Digital Twins. *Sensors*, 2020, 20(18), 5103, <https://doi.org/10.3390/s20185103>
- Varghese, S.A., et al. (2022). Digital Twin-based Intrusion Detection for Industrial Control Systems. *2022 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops)*, pp. 611-617.

Assoc. Prof. Roumiana Ilieva, PhD

ORCID iD: 0000-0003-3871-9769
Web of Science Researcher ID: ADM-3035-2022
Scopus Author ID: 57211160456
Technical University of Sofia, Bulgaria
E-mail: rilieva@tu-sofia.bg

Gloria Stoilova

ORCID iD: 0009-0005-9732-3344
Web of Science Researcher ID: LBH-9795-2024
Technical University of Sofia, Bulgaria
E-mail: gloria.stoilova@gmail.com

ПОСТПРОЦЕСИРАНЕ ПРИ ИЗПОЛЗВАНЕ НА САМ СИСТЕМИ ЗА ГЕНЕРИРАНЕ НА УПРАВЛЯВАЩИ ПРОГРАМИ ЗА CNC МАШИНИ ЗА ЛАЗЕРНО РЯЗАНЕ

Стилиян Николов

Технически университет – София, България

Боян Бахчеванов

Технически университет – София, България

Резюме. В статията са дефинирани основните функции изпълнявани от постпроцесорите на САМ системите при генериране на програми за машини за лазерното рязане. Разгледани са особености при разработване на постпроцесори, използвани за генериране на управляващи програми за CNC машини за лазерно рязане с използване на САМ системи. Даден е пример за генериране на програми за CNC машина за лазерно рязане с използване на САМ системата SheetCam TNG.

Ключови думи: САМ системи, CNC машини, лазерно рязане, постпроцесиране

1. Увод

Лазерното рязане е една от най-прецизните и ефективни технологии за обработка на материали, която намира широко приложение в индустрията (Kellens, 2014). При нея се използва концентриран лазерен лъч, за високоскоростно и високоточно рязане на различни материали, включително метали, пластмаси, дърво и керамика. Има три основни вида: газови лазери, фибър и кристални лазери. Машините използващи като инструмент за рязане или гравирание лазерен лъч са добили популярност като лазер кътери (Laser cutters). Това са машини със CNC управление, които се използват за прецизно рязане или гравирание на изделия от различни материали. CNC системата за управление, на машините за лазерно рязане, осигурява контролиране на режима на работа на използвания лазер и движението на лазерния лъч, най-често в равнината XY, спрямо обработвания детайл. Създаването на управляваща програма за една машина за лазерно рязане, не се различава съществено от създаването на управляваща програма при 2½ обработки с използване на обработващи центри. В зависимост от сложността на изрязвания контур, това може да се извърши ръчно или с използване на САМ система (Urinov, 2023). В настоящата статия са разгледани основните етапи при генериране на управляващи програми за машини за лазерно рязане с използване на САМ системи и спецификата при постпроцесирането на създадените с тях обработки.

2. Генериране на управляващи програми за машини за лазерно рязане с използване на САМ системи

Основните етапи при генериране на управляващи програми за машини за лазерно рязане с използване на САМ системи това са:

- **Задаване на информация за обработващата машина**

Информацията за обработващата машина включва: типът на машината, размерите на работната зона, видът на режещата глава, която ще се използва и др.

Тази информация може да се запази във файл и да се използва при генериране на управляващи програми за тази машина с CAM системата.

- **Задаване на обработвания контур**

Обработваният контур може да се създаде в CAM системата или да се импортира, ако е бил предварително създаден с използване на CAD система.

При въвеждане на обработвания контур, той трябва да се позиционира в работната зона на машината и да се определи началото на работната координатна система, в която ще се описва неговата обработка.

След въвеждане на обработвания контур в CAM системата, той може да бъде модифициран, чрез мащабиране и размножаване (създаване на копия чрез ротация, трансляция или симетрия), в зависимост от инструментариума с който разполага използваната система.

- **Генериране на пътя на режещата глава**

Преди да се генерира пътя на режещата глава, потребителя може да добави към контура, който желае да изреже допълнителна информация, като: начална и крайна позиция на режещата глава; участъци от контура, които да не се изрязват (служат за поддържане на изрязвания детайл по време на обработването); траектория на движение на режещата глава между отделните изрязвани контури и др.

Пътят на режещата глава се генерира автоматично от системата въз основа на въведените в данни.

- **Симулиране и редактиране на генерираната обработка**

За осъществяване на симулацията е необходимо да се зададе формата и размерите на заготовката. При откриване на груби грешки в пътя на режещата глава, след края на симулацията, той може да се редактира чрез промяна на въведените параметри за обработвания контур. CAM системите, обикновено позволяват ръчно премахване или добавяне на движение за режещата глава.

- **Постпроцесиране**

Генерирането на управляваща програма се постига чрез постпроцесиране на получения път на режещата глава. За целта се избира постпроцесор, съответстващ на CNC системата за управление на машината. Създаденият път на режещата глава може да се постпроцесира многократно за създаване на управляващи програми за различни CNC системи.

- **Визуализация на управляващата програма и окончателна редакция**

Генерираната управляваща програма се визуализира в текстови редактор. При необходимост в нея с помощта на текстовия редактор могат да се извършат допълнителни корекции.

- **Въвеждане на управляващата програма в машината**

Въвеждането на генерираната управляваща програма в CNC системата на машината се извършва чрез използване на подходящ носител, на който тя да се запише, в зависимост от наличните входове на системата или чрез DNC система, позволяващ управлението на няколко машини, свързани в мрежа.

3. Постпроцесиране на генерирания път на инструмента.

Разработването на УП със CAM система се постига чрез преобразуване на данните, генерирани от системата и записани в CLData (Cutter Location Data) файл, във формат (код), подходящ за управление на конкретна CNC машина.

Това преобразуване се нарича постпроцесиране, а специализираната програма, използвана от CAM системата, която извършва преобразуването - постпроцесор.

Различните комбинации от обработваща машина и CNC система изискват различни постпроцесори (Liu, 2010), (Hadjiiski, 2012).

За решаване на проблемите, свързани с многообразието на съвременните CNC машини, в CAM системите се използват генерализирани (обобщени) постпроцесори. Те са предназначени за генериране на УП за фамилия CNC системи (обикновено разработвани от един производител).

Основните функции, изпълнявани от постпроцесора на една CAM система при генериране на машини за лазерното рязане са:

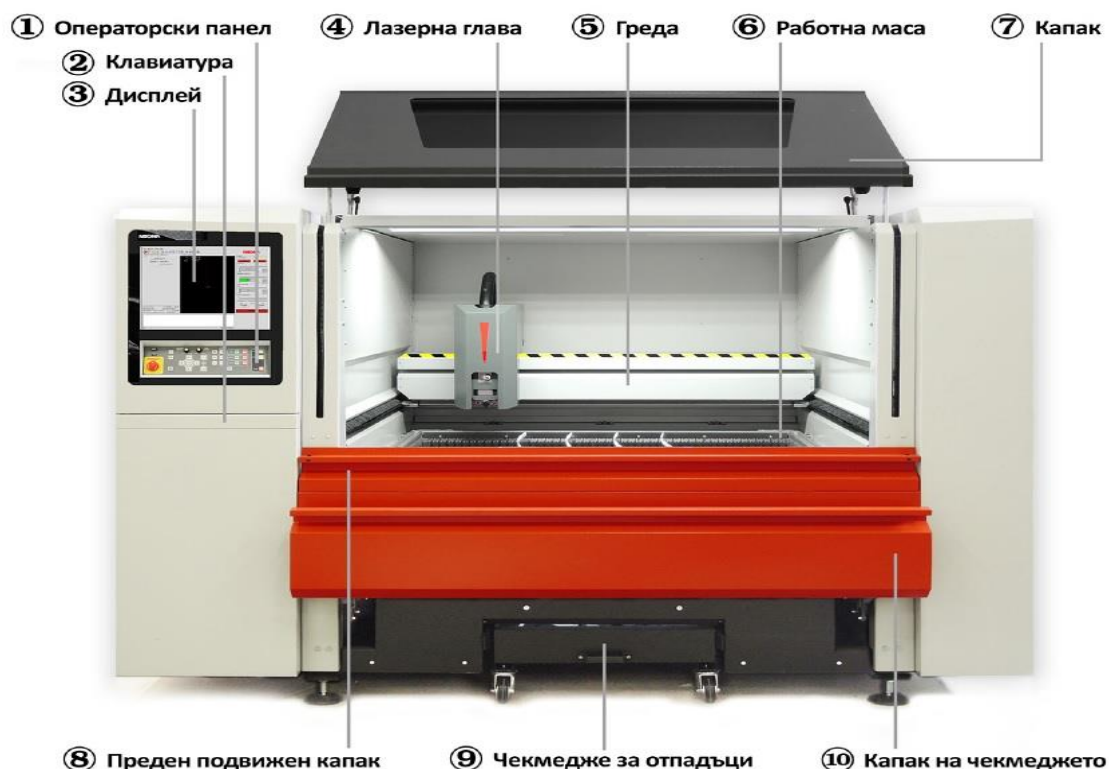
- прочитане на данните от CLData файла;
- преобразуване на данните за движение - позволява на потребителя да избира начина на извеждане на координатите на възловите точки от траекторията на движение абсолютно или инкрементално и използваните при това координатни системи;
- включване на допълнителни команди - позволява да се добавят команди и специални символи, за управление на специфични за лазерното рязане действия, изпълнявани от машината;
- генериране на разпечатка на програмата - контролира извежданата в програмата информация, включване на допълнителни данни, подпомагащи настройването на машината и записване на програмата във файл с формат, поддържан от CNC системата, за която е предназначена.

Постпроцесорът може да изпълнява и други специфични за конкретната машина функции, като добавяне на команди за управление на процеса на обработване, обработване на данни от включени към CNC системата измервателни сонди и др.

4. Генериране на програма за изрязване на детайл “Планка”

За демонстриране на възможностите на постпроцесирането при използване на CAM системи за генериране на управляващи програми за CNC машини за лазерно рязане, ще бъде използване CAM системата SheetCam TNG (<https://sheetcamshop.myshopify.com>, 2025). Чрез нея ще се генерира програма за обработване на детайл “Планка”, върху машина за лазерно рязане “Neona Fiber 3000” (www.neona.com, 2025) фиг.1.

Машината “Neona Fiber 3000”, използва фибро лазерен източник с мощност 3000 [W]. Това ѝ позволява да реже листов материал от: стомана с дебелина до 6 [mm], алуминий с дебелина до 6 [mm] и месинг с дебелина до 3 [mm]. При рязане може да се използва обдухване с: кислород (O₂), азот (N₂) или въздух (Air). Машината се управлява от CNC системата LinuxCNC GUI – AXIS user interface.



Фиг. 1. CNC машина за лазерно рязане “Neona Fiber 3000“

При рязането е възможно контролиране на:

- режима на работа на лазерния източник - непрекъснат (Continuous mode) или импулсен (Pulsed mode);
- мощността на лазера в [%]; ;
- честотата на импулсите (Pulsed mode) в [Hz];
- продължителността на импулсите (Pulsed mode) в [ms];
- налягането на работния газ (Gas Pressure) в [Bar];
- изчакване за пробиване (Pierce delay) в [sec];
- позиция на фокуса (Focus Position) в [mm];
- височина на следене при рязане (Cut height) в [mm];
- височина на следене при пробиване (Pierce height) в [mm];
- температурата на лазерния източник (Temperature) в диапазон 10÷40 [°C];
- скоростта на рязане (Cutting Speed) [mm/min];
- обдухващия газ.

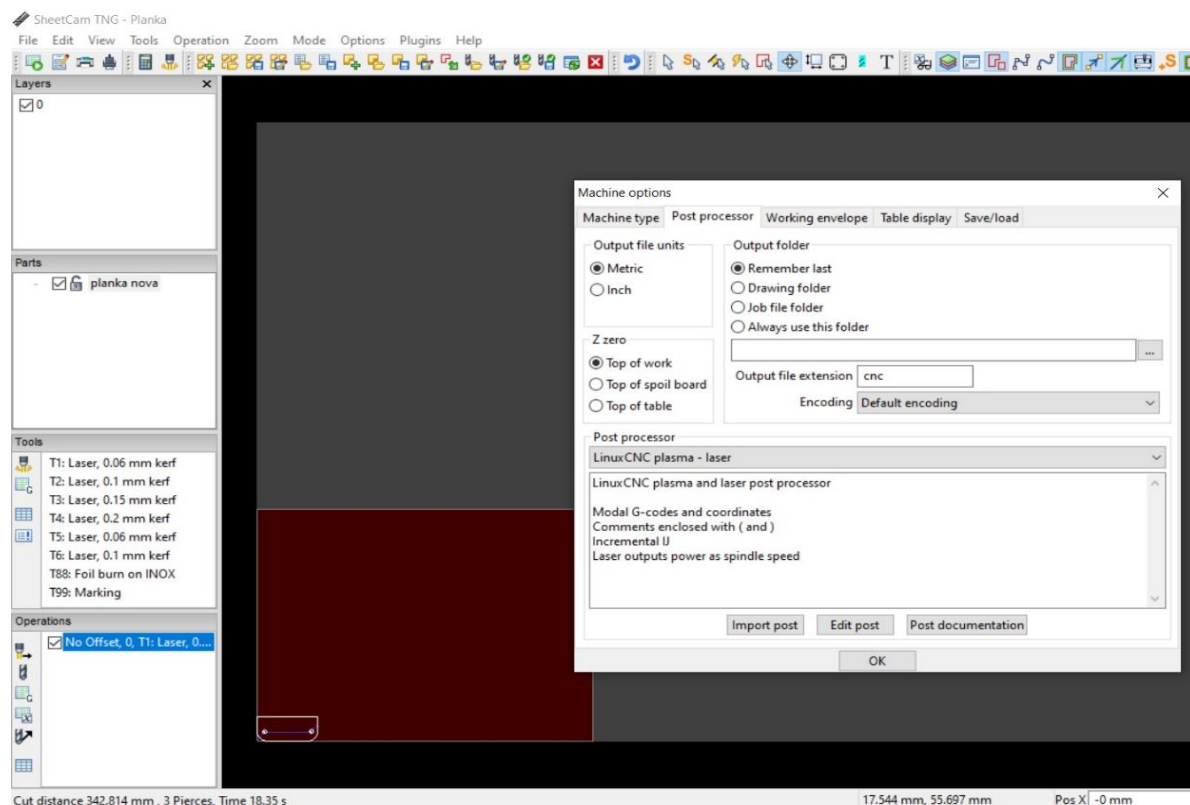
Част от тези параметри могат да се контролират програмно чрез използване на параметрични М командите от вида **MXXX PXXX** като:

M150 P50 – задава мощност на лазера 50%,

M103 P4 - Задава позиция на фокуса спрямо върха на дюзата 4 [mm],

M110 - Включва лазера,

M111 - Изключва лазера и др.



Фиг. 2. Контур за изрязване на детайл “Планка” в средата на SheetCam

CAM системата SheetCam приема данни във формати като: DXF, HPGL, SVG и др. Разполага с няколко конфигурируеми постпроцесора и позволява създаване на потребителски постпроцесори за конкретни комбинации обработваща машина CNC система.

SheetCam позволява размножаване на въведени контури за обработване, чрез: копиране, дублиране, завъртане и симетрия. Системата визуализира траекториите на режещата глава, при генерираните обработки.

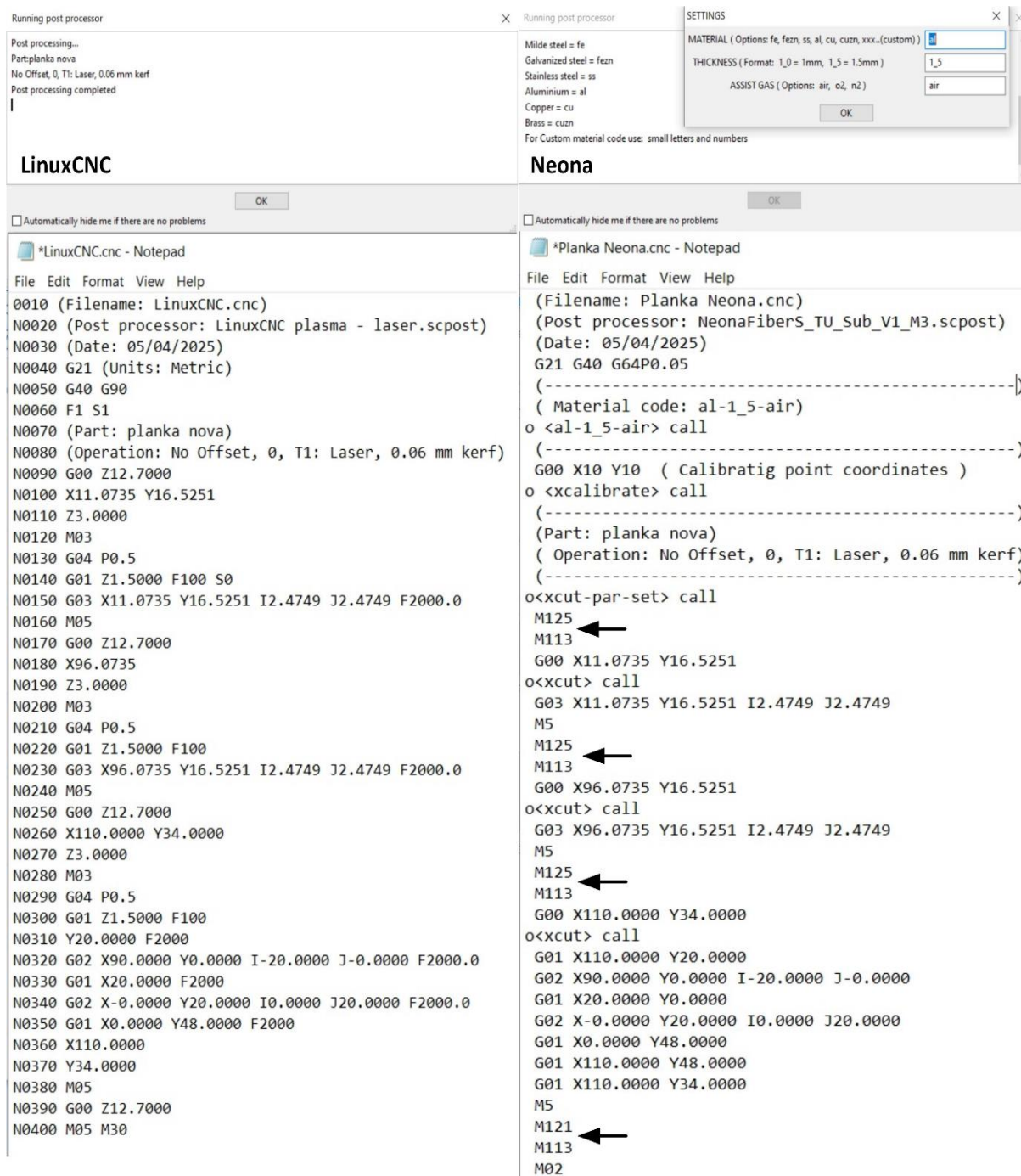
На фиг.2 е показан импортвания контур за изрязване на детайл “Планка” в средата на SheetCam, избраният постпроцесор и неговите първоначални настройки.

На фиг.3 са показани диалозите за стартиране на процеса на постпроцесиране и генерираните програми за изрязване на детайл “Планка” с използване на:

- постпроцесор за CNC системата LinuxCNC – доставен със SheetCam;
- постпроцесор Neona – разработен специално за “Neona Fiber 3000”.

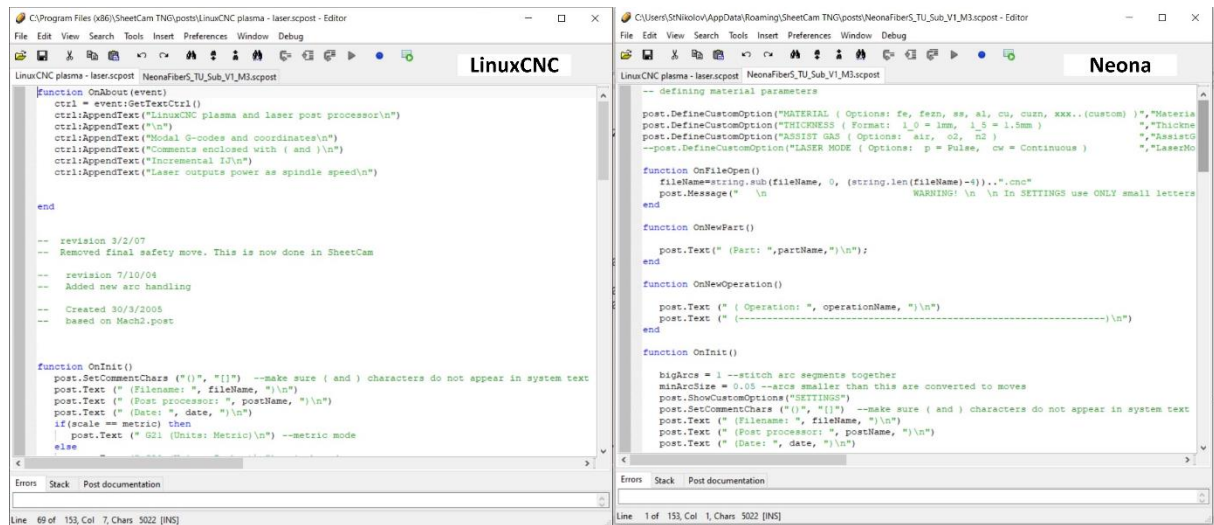
На генерираната с помощта на постпроцесора Neona програма със стрелки са показани добавените от постпроцесора параметрични M команди, използвани за управление на машината:

- **M113** - изключва подаването на обдухващ газ;
- **M121** - вдига лазерната глава на максимална височина;
- **M125** - вдига лазерната глава на 10-12 [mm] височина от материала, когато главата е била на работна височина.



Фиг. 3. Генериране на програма за изрязване на детайл "Планка"

За създаване и редактиране на постпроцесори SheetCam използва макро езика Lua (www.lua.org, 2025). Двата използвани постпроцесора отворени в текстовият редактор за постпроцесори предоставен от SheetCam са показани на фиг.4.



Фиг. 4. Редактиране на постпроцесори в SheetCam

Постпроцесора Neona включва различни модули, някои от които са:

- дефиниране на стартовия диалог фиг.3

-- defining material parameters

```
post.DefineCustomOption("MATERIAL ( Options: fe, fezn, ss, al, cu, cuzn, xxx..(custom) )","Material",sc.unitTEXT)
```

```
post.DefineCustomOption("THICKNESS ( Format: 1_0 = 1mm, 1_5 = 1.5mm )","Thickness",sc.unitTEXT)
```

```
post.DefineCustomOption("ASSIST GAS ( Options: air, o2, n2 )","AssistGas",sc.unitTEXT)
```

```
--post.DefineCustomOption("LASER MODE ( Options: p = Pulse, cw = Continuous )","LaserMode",sc.unitTEXT)
```

- задаването на края на програмата фиг.3

```
function OnFinish()
```

```
    post.Text(" M121\n M113\n M02\n")
```

```
end
```

- избор инструмент (предварително дефинирани настройки, за параметрите на фибро лазера)

```
function OnToolChange()
```

```
    if (tool==88) then
```

```
        post.Text ("o<xfoil-par-set> call\n")
```

```
    elseif (tool==99) then
```

```
        post.Text ("o<xmark-par-set> call\n")
```

```
    else
```

```
        post.Text ("o<xcut-par-set> call\n")
```

```
    end
```

```
end
```

5. Изводи

Използването на CAM системи за генериране на управляващи програми за CNC машини за лазерно рязане, значително облекчава работата на програмиста и му предоставя възможност да оптимизира обработването на детайлите.

Дефинирани са основните функции изпълнявани от постпроцесорите на CAM системите при генериране на машини за лазерното рязане.

Редактирането на предоставяните от CAM системите постпроцесори, позволява да се отчетат всички особености, на комбинацията обработваща машина – CNC система. Генерираните с използването на модифицирани постпроцесори програми, не изискват допълнително редактиране и могат да се изпълнят директно от машината, което намалява времето за настройване на машината.

REFERENCES

- Hadjiiski, P., Kaldashev, T. (2012). Creation of lather postprocessor generate repeated cycle in an environment of PRO/ENGINEER. *International scientific conference· FIT'2012. Association of Machine technology faculties in Bulgaria AMTECH'2012. pp.2 45-249*
- Kellens, K., Rodrigues, G., Dewulf, W., Duflou, J. (2014). Energy and Resource Efficiency of Laser Cutting Processes. *8th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014. Published by Elsevier B.V. DOI:10.1016/j.phpro.2014.08.104*
- Laser machines. (2025), [viewed 12 March 2025]. (in Bulgarian). Available from: <https://www.neona.com>
- Liu, J., Tu, H., Zhang, C. (2010). The research and development on the post-processing algorithm for four-axis CNC machines with swing-head and tilt platform. *2010 International Conference On Computer Design and Applications*. ISBN:978-1-4244-7164-5. DOI: 10.1109/ICCDA.2010.5541328
- Lua. (2025), [viewed 12 March 2025]. (in Bulgarian). Available from: <http://www.lua.org>
- SheetCam. (2025), [viewed 12 March 2025]. (in Bulgarian). Available from: <https://sheetcamshop.myshopify.com/pages/features>
- Urinov, N. (2023). Determination of the main directions and principles of development of CAD/CAM systems in the processing of workpieces on CNC machines. *Intent Research Scientific Journal-(IRSJ) ISSN (E): 2980-4612 Volume 2, Issue 3, March -2023 pp. 72-76*

POST-PROCESSING USING CAM SYSTEMS TO GENERATE PROGRAMS FOR CNC LASER CUTTING MACHINES

Abstract. The article defines the main functions performed by postprocessors of CAM systems when generating programs for laser cutting machines. Features of the development of postprocessors used to generate control programs for CNC laser cutting machines using CAM systems are considered. An example of generating programs for a CNC laser cutting machine using the SheetCam TNG CAM system is given.



Keywords: CAM systems, CNC machines, laser cutting, post-processing

Prof. Stiliyan Nikolov, PhD

ORCID iD: 0000-0002-2485-3847

Web of Science Researcher ID: ACY-7901-2022

Technical University of Sofia

Sofia, Bulgaria

E-mail: st_nikolov2@tu-sofia.bg

Assist. Prof. Boyan Bahchevanov, PhD

Technical University of Sofia

Sofia, Bulgaria

E-mail: bab@tu-sofia.bg



Име и Фамилия	Страница
Алдин Хаджиев	52
Анна-Мария Лазарова	9, 18
Боян Бахчеванов	131
Веселина Александрова	85
Емил Петров	62
Иван Христозов	85
Иван Чакъров	85
Йото Йотов	62
Петър Маринов	93, 103
Ренета Димитрова	9
Стилиян Николов	18, 131
Чавдар Костадинов	85
Aleksander Vukov	112
Dimitar Totev	70
Gabriela Kotseva	27
Gloria Stoilova	123
Izabela Radkova	44
Miglena Paneva	27
Milena Haralampieva	112
Nina Valchkova	35
Peter Panev	27
Roman Zahariev	35
Rosen Petrov	112
Roumiana Ilieva	123
Slav Dimitrov	77
Tatyana Vakarelska	44

