

Mitrović, S, Jakovljević Ž.

**PRIMENA DISTRIBUIRANOG SISTEMA UPRAVLJANJA BAZIRANOG NA IEC  
61499 I 802.15.4 STANDARDIMA**

**Rezime:** *Savremene proizvodne sisteme karakteriše potreba za kratkim odzivom na nove tržišne zahteve, uz vrhunski kvalitet proizvoda i maksimalnu efikasnost. Tako visok tehnološki nivo dostiže se primenom fleksibilnih tehnologija, čiji su osnov proizvodna sredstva sa rekonfigurabilnom hardverskom i softverskom strukturom. Distribuirano upravljanje podržava opisani pristup proizvodnji kroz decentralizovano izvršavanje upravljačkog zadatka na više inteligentnih (pametnih) uređaja. Uz adekvatnu primenu, distribuirano upravljanje može dovesti do značajnih ušteda energije, materijala i vremena. U okviru ovog rada opisan je distribuirani sistem upravljanja pneumatskim robotom zasnovan na standardu IEC 61499, uz upotrebu komunikacije bazirane na standardu IEC 802.15.4.*

**Ključne reči:** *distribuirano upravljanje, IEC 61499, ZigBee, pneumatski robot*

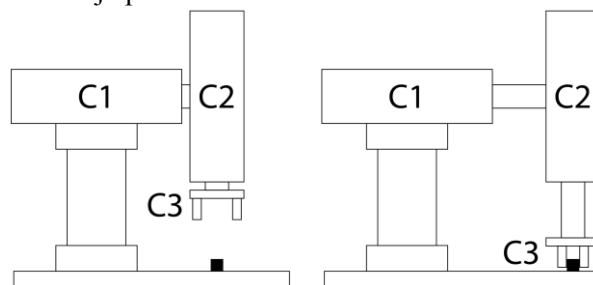
## 1. UVOD

Kibernetsko-fizički sistemi (*engl. CPS - Cyber-Physical Systems*) i internet stvari (*engl. IoT – Internet of Things*) predstavljaju nove koncepte koji, pod uticajem paradigme masovne kastomizacije i inicijative „Industrie 4.0“, polako pronalaze svoje mesto u industriji. Novi način proizvodnje podrazumeva primenu „pametnih“ (*engl. smart*) uređaja, modularan pristup gradnji sistema, kao i sveprisutnu vertikalnu i horizontalnu povezanost (umreženost) ljudi i uređaja [1]. Povezivanjem fizičkih objekata („pametnih“ senzora i aktuatora) sa digitalnim modelima, uz njihovo istovremeno međusobno povezivanje putem interneta stvari, dostiže se novi nivo apstrakcije koji omogućava upravljanje složenim procesima distribuiranjem upravljačkih zadataka na inteligentne proizvodne resurse [2]. „Pametni“ uređaji su modularni, portabilni i interoperabilni, što otvara mogućnost gradnje sistema koji se lako i brzo rekonfigurišu prema novim zahtevima. Eliminacijom centralnog upravljačkog sistema i distribucijom upravljačkog zadatka na međusobno povezane „pametne“ uređaje, moguće je postići značajne uštede u pogledu upotrebljenog hardvera, pošto se tip i broj komponenata sistema može vrlo precizno prilagoditi konkretnom zadatku, izbegavajući redundantnost koju često nameće tradicionalni pristup. Tehnologija i odgovarajući standardi koji bi trebalo da podrže opisani koncept još uvek su u fazi razvoja. Za eksperimentalne potrebe uglavnom se koriste široko dostupne, univerzalne hardverske platforme sa mikrokontrolerskom ili SoC (*engl. System on Chip*) bazom.

U ovom radu, pomenuti koncepti biće opisani kroz analizu razvijenog distribuiranog sistema upravljanja, implementiranog na eksperimentalnoj platformi koja emulira pneumatskog robota sa dva translatorna stepena slobode kretanja i pneumatskim hvatačem.

## 2. HARDVERSKA STRUKTURA I ZADATAK UPRAVLJANJA ROBOTOM

Razmatrani pneumatski „pick and place“ robot sadrži tri inteligentna aktuatora – dva cilindra za ostvarivanje translatornog kretanja i hvatač. Svaki od ovih aktuatora, C1, C2 i C3, pored samog pneumatskog cilindra, poseduje električno upravljani monostablinski razvodnik 5/2 za upravljanje radom cilindra, dva krajnja prekidača i sopstveni upravljački sistem – čvor, sačinjen od mikrokrolera i komunikacionog modula kojim se vrši bežično povezivanje sa preostala dva čvora. Emulirani robot ima za zadatak da podigne objekat u svojoj neposrednoj blizini i premesti ga na predviđenu lokaciju u okviru radnog prostora, kao što je prikazano na slici 1.



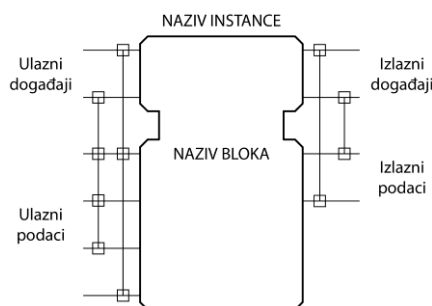
Sl. 1. Skica emuliranog pneumatskog robota

Za vreme rada, robot izvodi kretanje koje je opisano sekvencom:

$C2 + C3 + C2 - C1 + C2 + C3 - C2 - C1 -$ , (1)  
odnosno, spušta ruku, hvata objekat, podiže ruku, odlazi do lokacije, spušta ruku, ispušta objekat, podiže ruku i vraća se u početnu poziciju.

### 3. FUNKCIJSKI BLOKOVI

IEC 61499 je standard koji definiše razvoj, primenu i ponovnu upotrebu funkcijskih blokova u okviru industrijske automatizacije [3]. Funkcijski blok predstavlja osnovni gradivni element za modeliranje ponašanja sistema [4]. Moguće je modelirati kako softverske, tako i hardverske komponente sistema. Suštinski, standard IEC 61499 definiše objektno orijentisani grafički jezik za programiranje centralizovanih i distribuiranih upravljačkih sistema, pri čemu se funkcijski blokovi mogu posmatrati kao klase, čije instance u konkretnim slučajevima služe za obavljanje zadataka. Opšti model funkcijskog bloka prikazan je na slici 2.

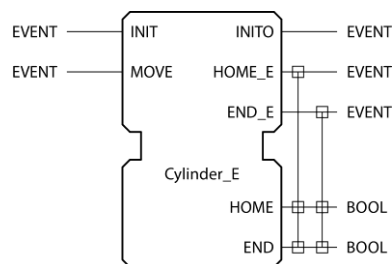


Sl. 2. Opšti funkcijski blok

Gornji deo bloka naziva se glava, unutar koje se definišu ulazni i izlazni događaji. Donji deo bloka naziva se telo, unutar kog se definišu ulazne i izlazne promenljive. Ulazni događaji i promenljive nalaze se s leve, a izlazni događaji i promenljive sa desne strane bloka. Svakom ulaznom/izlaznom događaju pridružene su ulazne/izlazne promenljive, čije vrednosti se očitavaju/osvežavaju u trenutku dešavanja datog događaja. Blok se aktivira, odnosno, započinje obavljanje definisanog zadatka po prispeću odgovarajućeg ulaznog događaja. Po obavljenom zadatku, generiše se odgovarajući izlazni događaj. Unutar bloka definišu se funkcije koje se aktiviraju ulaznim događajima, izvršavaju se nad vrednostima ulaznih promenljivih i generišu vrednosti izlaznih promenljivih i izlazne događaje.

U okviru ovog rada, za modeliranje sistema upravljanja korišćeno je razvojno okruženje FBDK [5], čiji je sastavni deo biblioteka već definisanih funkcijskih blokova potrebnih za razvoj konkretnih aplikacija. Specifični tipovi blokova mogu se posebno razvijati, a moguće je i modifikovati postojeće blokove. U ovom slučaju,

modifikacijom je dobijen novi blok kojim je modelirana hardverska komponenta sistema – pneumatski cilindar (*Cylinder\_E*) – slika 3.



Sl. 3. Razvijeni funkcijski blok *Cylinder\_E*

*Cylinder\_E* se nakon inicijalizacije signalom INIT ponaša kao dvosmerni pneumatski cilindar – po pristizanju signala MOVE, u zavisnosti od trenutnog stanja, definisanog vrednostima promenljivih HOME (uvučeno) i END (izvučeno), dolazi do izvlačenja ili uvlačenja klipnjače. Po izvršenju postavljenog zadatka, blok generiše događaj HOME\_E (završeno uvlačenje) i END\_E (završeno izvlačenje), kojim obaveštava sve elemente sistema za koje je ovaj događaj interesantan da je izvršeno zadato kretanje.

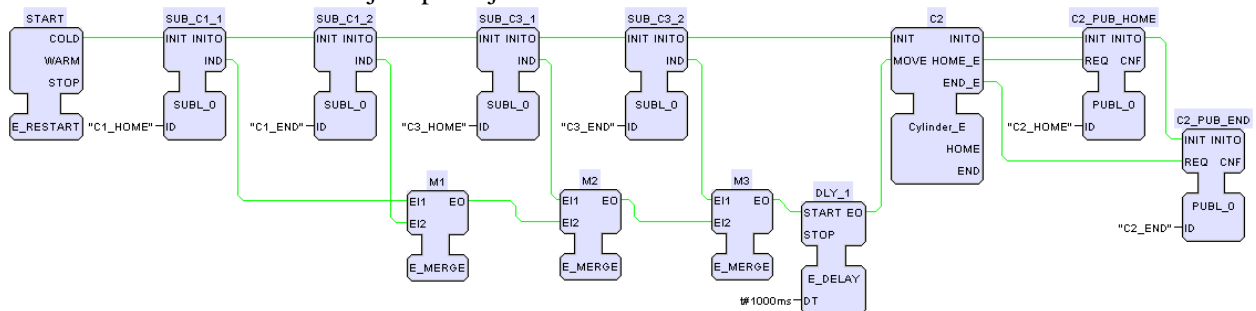
Prilikom kreiranja distribuiranog sistema upravljanja na osnovu standarda IEC 61499 polazna tačka je definisanje aplikacije koju sistem u celini treba da izvršava. Aplikacija se kreira povezivanjem odgovarajućih funkcijskih blokova. Logika razvijenog distribuiranog upravljačkog sistema za razmatrani pneumatski robot data je na slici 4. Osnovu prikazane logike čine funkcijski blokovi *Cylinder\_E*, koji je već opisan, i *E\_MERGE*, koji nad ulaznim događajima vrši „ILI“ logičku operaciju.

Funkcionalnost celokupnog sistema ostvarena je specifičnim načinom povezivanja ulaznih i izlaznih događaja, a kojim se eliminiše prenos vrednosti promenljivih. Posledično, isključena je potreba za prenosom velike količine podataka. Logika sa slike 4 omogućava funkcionisanje sistema u skladu sa sekvencom (1).

U okviru ovog rada, upravljanje se ostvaruje distribuirano, na tri „pametna“ čvora, po jedan čvor za svaki od tri aktuatora – C1, C2 i C3, pri čemu su čvorovi povezani u funkcionalnu celinu putem međusobne bežične komunikacije. Unutar FBDK okruženja, integralna logika sa slike 4 deli se na čvorove – definiše se koji će deo logike biti izvršavan na kom čvoru. Nakon podele logike, na mestima „preseka“ postavlja se odgovarajući komunikacioni interfejs koji vrši primanje informacija sa drugih čvorova, ili slanje informacija drugim čvorovima.

Na slici 5 prikazan je deo logike neophodan za funkcionisanje bežičnog čvora 2 koji upravlja cilindrom C2. *E\_MERGE* blokovi koji su deo

integralne logike celog sistema sa slike 4, čine jezgro upravljačke logike samo za cilindar C2, u programu predstavljenog blokom Cylinder\_E. Preostali blokovi su servisni i omogućavaju pravilno funkcionisanje celokupnog distribuiranog sistema ostvarujući komunikaciju između segmenata. Korišćeni su *publish* (PUBL\_0) i *subscribe* (SUBL\_0) blokovi, koji prenose informacije o događajima do i od ostalih delova distribuiranog sistema, respektivno. Korišćeni SUBL\_0 blokovi podešeni su da primaju informacije o stanju prvog čvora (C1) i trećeg čvora (C3), koji mogu biti u uvučenom (HOME) i izvučenom stanju (END). U zavisnosti od informacija dobijenih preko *subscribe* blokova, čvor koji upravlja cilindrom C2 dovodi aktuator u uvučeno, ili izvučeno stanje (HOME ili END). Nakon obavljanja zahtevane radnje, novo stanje Cylinder\_E bloka odašilje se putem PUBL\_0 blokova. Poslatu informaciju primaju samo



Sl. 5. Prikaz distribuirane logike za čvor koji upravlja cilindrom C2, zajedno sa komunikacionim interfejsom u vidu *subscribe* (SUBL\_0) i *publish* (PUBL\_0) blokova.

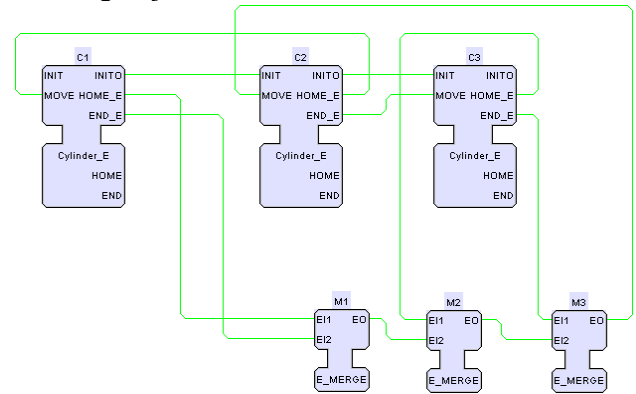
Nakon uspostavljanja virtuelnog modela upravljanja, pomenuti model je simuliran u okviru FBDK softvera u cilju provere ispravnosti rada. Po uspešno obavljenoj simulaciji, usledio je proces „prevođenja“ simulacionog kôda izraženog funkcijskim blokovima u jezik mikrokontrolera.

#### 4. BEŽIČNI ČVOROVI

IEC 61499 je trenutno u fazi razvoja, predstavlja podršku projektovanju distribuiranog upravljanja i još uvek nije na nivou programskog jezika koji se može koristiti neposredno na velikom broju uređaja. Osnovni razlog za to je što proizvođači industrijske opreme ne nude podršku za svoje uređaje u vidu IEC 61499 funkcijskih blokova, što bi u nastavku omogućilo jednostavnu integraciju novih komponenata u odgovarajuće razvojne softverske sisteme.

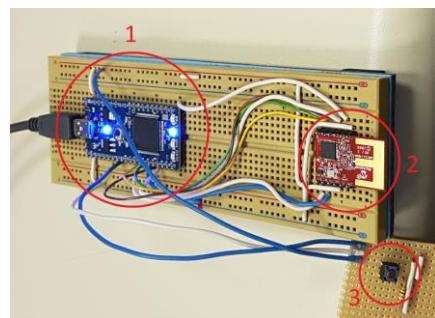
U okviru ovog rada su za implementaciju razvijenog distribuiranog sistema upravljanja korišćena 3 razvojna sistema *mbed NXP LPC1768* [6], svaki sa 32-bitnim ARM Cortex M3 mikrokontrolerom, sa radnim taktom od 96 MHz. Za ove mikrokontrolere ne postoji IEC 61499

čvorovi kojima je ona potrebna. S obzirom na to da se predstavljen oblik upravljanja realizuje bez prenosa vrednosti promenljivih i zavisi samo od promena stanja, on spada u vrstu upravljanja na bazi događaja.



Sl. 4. Upravljačka logika definisana funkcijskim blokovima

podrška. Iz navedenog razloga, mikrokontroleri su programirani programskim jezikom C++ čija se kompilacija odvija na serveru kompanije ARM [7]. C++ kôd za mikrokontrolere napisan je na osnovu aplikacije koja je razvijena u FBDK softveru. Odgovarajuće C++ klase generisane su emulirajući funkcijske blokove sadržane u FBDK aplikaciji kojom je u prvoj fazi izvedena simulacija distribuiranog sistema upravljanja.



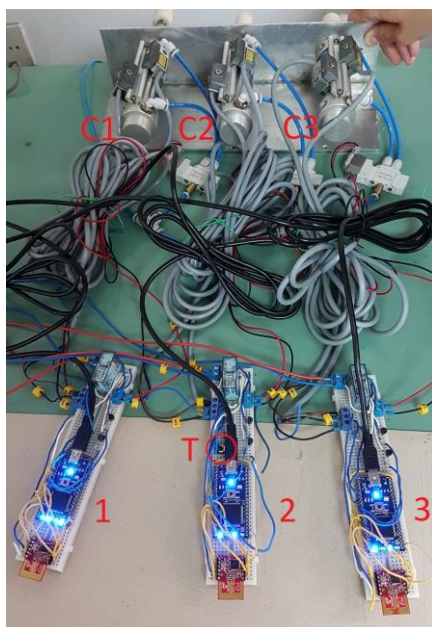
Sl. 6. Razvojni sistem mbed LPC1768 (1), Microchip MRF24J40MA 802.15.4 bežični modul (2) i taster za početak rada (3).

Za ostvarivanje bežične komunikacije između mikrokontrolera korišćen je integralni modul

Microchip MRF24J40MA [8] koji podržava IEEE 802.15.4 standard. Zajedno, mbed LPC1768 i MRF24J40MA čine bežični čvor (slika 6), sistem koji se može adresirati u bežičnoj mreži i čiji se zadaci mogu programirati.

## 5. EKSPERIMENTALNA PROVERA

Eksperimentalni sistem na kome je izvršena provera čine tri inteligentna pneumatska aktuatora (slika 7), opisana u poglavlju 2. Po puštanju u rad pritiskom na taster (T), sistem se ponašao očekivano. Izvlačenje i uvlačenje klipnjača odvijalo se predviđenim redosledom koji je zadat sekvencom (1). S obzirom na to da je upravljački sistem baziran na diskretnim događajima, od brzine pojavljivanja događaja zavisi brzina rada sistema. Na slici 7 očigledan je veliki broj kablova koji se u realnom sistemu mogu izbaciti postavljanjem čvorova direktno na aktuator.



Sl. 7. Kompletna eksperimentalna aparatura – bežični čvorovi 1, 2 i 3, dvosmerni pneumatski cilindri C1, C2 i C3 i taster za početak rada T.

U toku testiranja, periodično, bez ustaljenog vremenskog okvira, nakon nasumičnog broja ciklusa, dešavali su se zastoji u radu sistema, prouzrokovani greškama u bežičnoj komunikaciji. Greška je najverovatnije u delu softvera koji upravlja komunikacionim modulom i biće otklonjena u narednoj iteraciji. Iako sistem nije u potpunosti stabilan i zahteva dalje dorade, može se smatrati da je provera koncepta uspešno izvedena.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu ilustrovana je primena novog standarda IEC 61499 kroz projektovanje i izvedbu

varijante distribuiranog upravljačkog sistema zasnovanog na diskretnim događajima. Razvijeni sistem je predviđen za upotrebu na pneumatskom robotu sa tri pneumatska cilindra (konfiguracija TT – kartezijski robot). U ovoj fazi rada izvedeno je rano testiranje upravljačkog sistema, bez povezivanja sa realnim robotom. Upravljački sistem, kroz komunikaciju između čvorova, uspešno obavlja saopšteni zadatak, uz potpuno odsustvo bilo kakvog oblika centralizovanog upravljanja. Celokupan zadatak je podeljen (distribuiran) na tri korišćena čvora koji sinergetskim dejstvom izvode željene akcije. Predstavljeni sistem može se primeniti na pneumatskom robotu, ali je potrebno prethodno izvesti određena unapređenja, koja bi doprinela sigurnijem radu.

## 7. REFERENCE

- [1] MacDougall, William, *INDUSTRIE 4.0 Smart Manufacturing for the Future*, Berlin, Germany Trade and Invest, 2014.
- [2] Zivana Jakovljevic, Stefan Mitrovic, Miroslav Pajic, *Cyber Physical Production Systems - An IEC 61499 Perspective*, Belgrade, Springer, 2017.
- [3] Valeriy Vyatkin, *IEC 61499 Function Blocks for Embedded and Distributed Control Systems Design*, 2<sup>nd</sup> edition, ISA, 2012.
- [4] James H. Christensen, Thomas Strasser, Antonio Valentini, Valeriy Vyatkin, Alois Zoitl, *The IEC 61499 Function Block Standard: Overview of the Second Edition*, ISA, 2012.
- [5] HOLOBLOC, INC – izvor FBDK softvera <http://www.holobloc.com/>
- [6] mbed LPC1768 stranica <https://os.mbed.com/platforms/mbed-LPC1768/>
- [7] online mbed ARM kompajler <https://os.mbed.com/accounts/login/?next=%2Fcompiler%2F>
- [8] Microchip MRF24J40MA stranica <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/MRF24J40MA>

**Autori:** Stefan Mitrović, istraživač-saradnik, Istraživačko-razvojni institut Lola, d.o.o, Kneza Višeslava 70a, 11030, Beograd,

**Dr Živana Jakovljević, vanredni profesor,** Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120, Beograd.

E-mail: [stefan.mitrovic@li.rs](mailto:stefan.mitrovic@li.rs)  
[zjakovljevic@mas.bg.ac.rs](mailto:zjakovljevic@mas.bg.ac.rs)

**Zahvalnica:** U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektima pod evidencionim brojevima TR35004 i TR35020 koje finansijski podržava MPNTR Republike Srbije.