ПРЕДГОВОР

Еволуција система аутоматског управљања у назад стотињак година је праћена непрекидним развојем различитих техника и технологија, прво из области електронике и комуникација, а онда и рачунарства и информатике. Резултат тога био је настанак више управљачких стратегија које су своју примјену нашле у различитим сферама људског дјеловања. Управљачке стратегије и системи у којима су оне имплементиране се разликују по специфичним захтјевима и ограничењима која треба да се превазиђу, како би се управљачки задаци успјешно извршавали.

Данашњи системи аутоматског управљања су углавном базирани на мрежним концептима управљања и информационим и рачунарским технологијама. Једна врста оваквих система су умрежени системи управљања настали интеграцијом мрежних комуникационих концепата и система аутоматског управљања. Умрежени системи управљања су системи аутоматског управљања са повратног спрегом код којих је повратна спрега затворена преко комуникационе мреже. Како се умрежени системи управљања, нарачито они индустријски, у општем случају састоје од великог броја управљачких компоненти (сензора, регулатора, актуатора) које су повезане комуникационом мрежом, тако су они послужили као узор за настанак система у којима су комуникационом мрежом повезани не само сензори или сензори и актуатори него и други електронски склопови и уређаји који имају могућност размјене података. Умрежени системи управљања су својом појавом и својим развојем заправо поставили темеље и дали смјернице за развој комуникационих система који су обједињени у концепту интернета ствари. Очигледна повезаност умрежених система управљања и интернета ствари посљедњих година заокупља велику пажњу научника са циљем истраживања могућности њиховог спајања у јединствену цјелину. Резултат ових истраживања су нови концепти у аутоматском управљању системима настали интеграцијом информационих и рачунарских техника са системима управљања који су садржани у парадигмама какве су управљање у облаку, роботика у облаку, индустријски интернет ствари, интернет роботских ствари и други слични који крче пут ка потпуној испуњености и имплементацији захтјева прво четврте а затим и пете индустријске револуције.

За разумијевање савремених концепата који се примјењују у индустријској аутоматизацији, неопходно је имати разумијевање умрежених система управљања и савремених информационих, комуникационих и рачунарских технологија. Наиме, системи индустријске аутоматизације који припадају парадигмама Индустрије 4.0 и Индустрије 5.0 базирани су на умрежавању, интернету ствари, рачунарству у облаку, на ивици и у магли, машинском учењу, вјештачкој интелигенцији, виртуелној и проширеној реалности, виртуелизацији, комуникационим мрежама пете и шесте генерације, хаптичким системима, телеоперацијама, колаборацији људи и машина, те другим напредним техникама и технологијама. Овај уџбеник има

за циљ да читаоцима приближи наведене и друге напредне концепте из области аутоматског управљања системима и система индустријске аутоматизације. Уџбеник је превасходно намијењен студентима Електротехничког факултета Универзитета у Источном Сарајеву као основна литература за предмете „Интернет ствари у системима аутоматског управљања" који се изучава на првом циклусу студија и „Савремени концепти у индустријској аутоматизацији" који се изучава на другом циклусу студија, али и свима осталима којима је обрађена проблематика блиска.

Уџбеник садржи седам поглавља. У уводном поглављу дат је кратак преглед развоја система аутоматског управљања. Друго и треће поглавље обрађују умрежене системе управљања, рачунарске и индустријске комуникационе мреже и њихов утицај на рад умрежених система управљања. Четврто поглавље је посвећено савременим информационим, комуникационим и рачунарским технологијама у системима аутоматског управљања и системима индустријске аутоматизације са нагласком на интернет, индустријски интернет, интернет ствари, индустријски интернет ствари, рачунарство у облаку, на ивици и у магли, те управљање у облаку. У петом поглављу разматра се дигитална трансформација у индустријској аутоматизацији, сајбер-физички системи, Индустрија 4.0, паметни производни системи и савремени концепти у роботици. У шестом поглављу обрађени су напредни концепти индустријске аутоматизације, односно Друштво 5.0, Индустрија 5.0, тактили интернет и метаверзум у индустрији. Седмо поглавље је посвећено безбједносним аспектима у индустријским системима управљања и системима индустријске аутоматизације.

Источно Сарајево, 2025. године

Аутор

САДРЖАЈ

1. УВОД 1

2. УМРЕЖЕНИ СИСТЕМИ УПРАВЉАЊА 9

2.1. Компоненте умрежених система управљања 10
2.1.1. Сензори 10
2.1.2. Регулатори 11
2.1.3. Актуатори 11
2.1.4. Комуникациона мрежа 12
2.2. Категорије умрежених система управљања 12
2.3. Приступи у пројектовању умрежених система управљања 15
2.4. Индустријски умрежени системи управљања 17
2.4.1. Системи за рад у реалном времену 20
2.4.2. Захтјеви индустријских управљачких апликација 22
2.5. Мултиагентски и сложени системи управљања 25

3. КОМУНИКАЦИОНА МРЕЖА У СИСТЕМИМА АУТОМАТСКОГ УПРАВЉАЊА 29

3.1. Развој комуникационих мрежа за индустријску аутоматизацију 30
3.2. Рачунарске комуникационе мреже 32
3.2.1. Врсте рачунарских мрежа 32
3.2.2. ISO/OSI референтни модел 34
3.2.3. Функције физичког слоја 36
3.2.3.1. Технике преноса података 36
3.2.3.2. Додјела капацитета преносног медијума 37
3.2.4. Функције слоја везе 38
3.2.4.1. Контрола приступа медијуму за пренос података 38
3.2.4.2. Технике за поуздан пренос података 39
3.2.5. Функције мрежног и транспортног слоја 39
3.2.5.1. Адресирање и рутирање на мрежном слоју 39
3.2.5.2. Протоколи транспортног слоја 40
3.2.6. Апликационо оријентисани слојеви 40
3.2.7. Параметри рачунарских мрежа 41
3.2.8. Локалне рачунарске мреже 42
3.2.9. Бежичне локалне рачунарске мреже 45
3.2.10. Бежичне личне рачунарске мреже 47
3.3. Индустријске комуникационе мреже 48
3.3.1. Индустријске магистрале 50
3.3.1.1. Индустријски етернет 51
3.3.1.2. Foundation Fieldbus 53
3.3.1.3. PROFIBUS 54
3.3.1.4. MODBUS 56
3.3.1.5. CAN 57
3.3.1.6. HART 58
3.3.1.7. Time-Triggered протоколи 59
3.3.2. Индустријски протоколи за бежични пренос података 60
3.3.3. Бежичне сензорске мреже 62
3.3.3.1. Bluetooth 64
3.3.3.2. ZigBee 65
3.3.3.3. WirelessHART 66
3.3.3.4. WSAN-FA (IO-Link wireless) 67

3.4. Утицај комуникационе мреже на перформансе умрежених система управљања 68
3.4.1. Мрежна кашњења 69
3.4.2. Губитак података 74
3.4.3. Ограничења пропусног опсега и квантизација 77
3.4.4. Утицај различитих комуникационих протокола на перформансе система 80
3.4.5. Стабилност 82

4. ИНФОРМАЦИОНЕ, КОМУНИКАЦИОНЕ И РАЧУНАРСКЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ У СИСТЕМИМА АУТОМАТСКОГ УПРАВЉАЊА 85

4.1. Интернет и индустријски интернет 86
4.2. Интернет ствари 90
4.2.1. Елементи IoT система 92
4.2.2. Информациона архитектура интернета ствари 94
4.2.3. Савремене комуникационе технологије у интернету ствари 96
4.2.3.1. Протоколи физичког и слоја везе 97
4.2.3.2. Протоколи мрежног слоја 100
4.2.3.3. Протоколи транспортног слоја и слоја апликација 101
4.2.4. Изазови у даљем развоју интернета ствари 102
4.3. Интернет ствари у системима аутоматског управљања 103
4.3.1. Интернет ствари система аутоматског управљања 105
4.4. Индустријски интернет ствари 107
4.4.1. Архитектура индустријског интернета ствари 109
4.4.2. Комуникација у индустријском интернету ствари 111
4.4.3. Рад у реалном времену, коегзистенција и интероперабилност IIoT уређаја 113
4.5. Савремене рачунарске технологије и интернет ствари 114
4.5.1. Рачунарство у облаку 115
4.5.2. Рачунарство у магли 116
4.5.3. Рачунарство на ивици 116
4.5.4. Упоредна анализа рачунарства у облаку, магли и на ивици 117
4.6. Управљање у облаку 119

5. ДИГИТАЛНА ТРАНСФОРМАЦИЈА У ИНДУСТРИЈСКОЈ АУТОМАТИЗАЦИЈИ 123

5.1. Дигитална трансформација 124
5.2. Сајбер-физички системи 126
5.2.1. Дефиниција и компоненте сајбер-физичких система 126
5.2.2. Структура индустријских сајбер-физичких система 129
5.2.3. Карактеристике и захтјеви индустријских сајбер-физичких система 130
5.2.4. Технологије индустријских сајбер-физичких система 131
5.2.5. Архитектура индустријских сајбер-физичких система 132
5.3. Индустрија 4.0 135
5.3.1. Референтна архитектура Индустрије 4.0 137
5.3.2. Пирамида аутоматизованог система у концепту Индустрије 4.0 138
5.4. Паметни производни системи у Индустрији 4.0 139
5.4.1. Генерички модел паметне производње 142
5.4.2. Паметна фабрика 145
5.4.2.1. Архитектура паметне фабрике 147
5.4.2.1.1. Ниво физичких ресурса 147
5.4.2.1.2. Ниво мреже 149
5.4.2.1.3. Ниво облака и ниво примјене података 150
5.4.2.2. Изазови у развоју паметних фабрика 152
5.4.3. Дигитални близанци у паметној производњи 154
5.4.3.1. Концептуални модел дигиталног близанца у паметној производњи 157

5.4.3.2. Формирање паметног производног система са дигиталним близанцем 159
5.5. Рачунарство на ивици мреже у Индустрији 4.0 162
5.5.1. Уређаји у индустријском рачунарству на ивици 163
5.5.2. Референтна архитектура индустријског рачунарства на ивици 167
5.5.3. Домен примјене индустријског рачунарства на ивици 170
5.5.4. Изазови у имплементацији индустријског рачунарства на ивици 172
5.6. Роботика у контексту Индустрије 4.0 173
5.6.1. Умрежени роботски системи 173
5.6.2. Колаборативна роботика 177
5.6.3. Роботика у облаку 180
5.6.4. Интернет роботских ствари 183

6. НАПРЕДНИ КОНЦЕПТИ У ИНДУСТРИЈСКОЈ АУТОМАТИЗАЦИЈИ 189

6.1. Друштво 5.0 190
6.1.1. Интеграција физичког и сајбер простора у Друштву 5.0 191
6.1.2. Друштво оријентисано на знање и друштво засновано на подацима 192
6.1.3. Дигитална трансформација и одрживи развој у Друштву 5.0 194
6.2. Индустрија 5.0 194
6.2.1. Референтна архитектура Индустрије 5.0 196
6.2.2. Оператер 5.0 197
6.2.3. Технологије Индустрије 5.0 198
6.2.4. Човјек у фокусу Индустрије 5.0 199
6.2.5. Колаборација људи и робота 200
6.2.6. Дигитални близанац човјека у контексту Индустрије 5.0 202
6.3. Тактилни интернет 204
6.3.1. Карактеристике и захтјеви тактилног интернета 206
6.3.2. Архитектура тактилног интернета у индустријским апликацијама 209
6.3.3. Хаптички кодеци за тактилни интернет 211
6.3.4. Комуникациони захтјеви тактилног интернета у индустријским апликацијама 213
6.3.5. Тактилни интернет у будућим индустријским апликацијама 214
6.4. Метаверзум у индустрији 216
6.4.1. Технологије метаверзума за Индустрију 5.0 218
6.4.2. Интеграција метаверзума са Индустријом 5.0 223
6.4.3. Метаверзум у роботици 224
6.4.4. Изазови и потенцијална рјешења за остварење индустријског метаверзума 225
6.4.4.1. Интеракција корисника 225
6.4.4.2. Рачунарски ресурси 226
6.4.4.3. Безбједност и приватност 227
6.4.4.4. Сајбер синдром – зависност од друштвених мрежа и сајбер малтретирање 228
6.4.4.5. Утицај интеракције човјека и рачунара на ментално оптерећење човјека 229
6.4.4.6. Етичка питања и стандардизација 230
6.4.5. Смјернице за будући развој апликација индустријског метаверзума 231

7. ИНФОРМАЦИОНА И САЈБЕР БЕЗБЈЕДНОСТ У ИНДУСТРИЈСКИМ СИСТЕМИМА УПРАВЉАЊА 235

7.1. Појам и модел индустријске сајбер безбједности 236
7.2. Стандарди индустријске информационе и сајбер безбједности 240
7.2.1. ISA/IEC 62443 241
7.2.2. ISO/IEC 27001, ISO/IEC 27019 242
7.2.3. NIST SP 800-82 244
7.2.4. NERC CIP 245
7.2.5. MITRE ATT&CK for ICS 246

7.3. Пријетње и рањивости у индустријским системима управљања 247
7.3.1. Пријетње 247
7.3.2. Рањивости 250
7.4. Заштита индустријских система управљања 252
7.4.1. Систем за детекцију упада 253
7.4.2. Сегментација мреже 254
7.4.3. Безбједност крајњих уређаја 256
7.4.4. Физичка безбједност 257
7.4.5. Подизање свијести о сајбер безбједности 258
7.4.6. Процјена ризика 258
7.5. Сајбер безбједност у индустријском интернету ствари и Индустрији 4.0 260
7.5.1. Пријетње у системима управљања у Индустрији 4.0 260
7.5.2. Безбједносни механизми у Индустрији 4.0 и M2M комуникацији 267
7.5.3. Стандардизација IIoT и M2M комуникације у Индустрији 4.0 270
7.5.3.1. 3GPP 271
7.5.3.2. ETSI OneM2M 272
7.5.3.3. ISO/IEC 27033:1:2015 272
7.5.3.4. ISA/IEC 62443 272
7.5.3.5. IEEE 273
7.5.3.6. NIST 273
7.5.3.7. IISF 273
7.5.3.8. Threat Intelligence 274
7.6. Безбједност нултог повјерења у Индустрији 4.0 275
7.6.1. Логички модел безбједности нултог повјерења 276
7.6.2. Безбједност нултог повјерења и модел одбране по дубини 277
7.6.3. Хибридни модел безбједности нултог повјерења 278
7.6.4. Безбједност нултог повјерења на нивоу производних машина 280

СКРАЋЕНИЦЕ 283

ЛИТЕРАТУРА 287

1.

УВОД

Развој индустрије кроз историју био је обиљежен технолошким напрецима који су омогућили ефикаснију и продуктивнију производњу. Два кључна концепта који су значајно допринијели овом развоју су механизација и аутоматизација. Ови процеси су трансформисали начин на који људи раде, производе и унапређују различите сегменте живота.

Механизација представља процес увођења машина у производњу како би се замијенио или смањио мануелни, односно физички рад људи. Започела је током прве индустријске револуције у 18. вијеку, када су парне машине и други механички уређаји значајно повећали продуктивност у текстилној индустрији и пољопривреди. Примјена механизације у овим и у другим областима, попут грађевинарства, рударства и саобраћаја, омогућила је већу производњу уз мање ангажовање људске снаге, што је довело до економског раста и убрзане урбанизације.

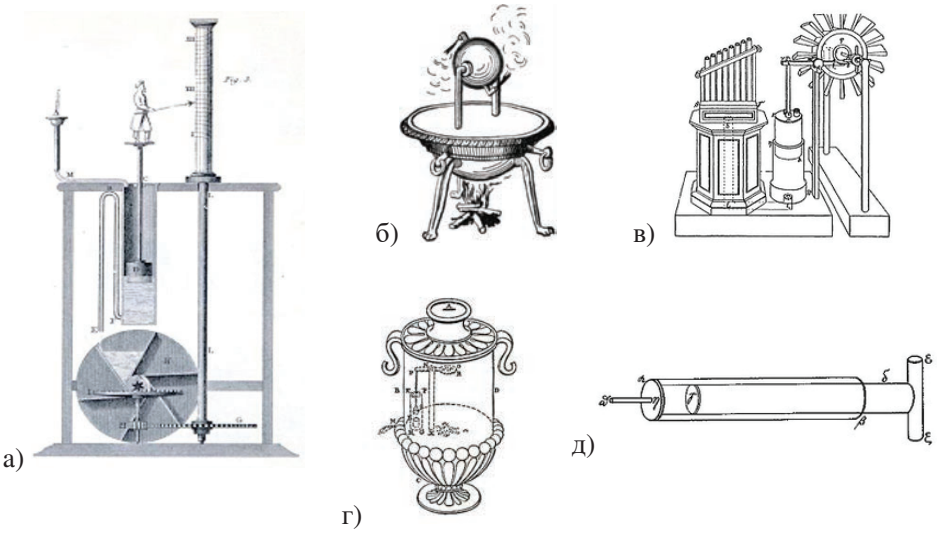
Аутоматизација представља наредну етапу у развоју производње, гдје машине не само да замјењују физички рад људи, већ преузимају и контролу над одређеним процесима без директног људског учешћа. Употребом машина у производњи јесте замијењен физички рад људи радом машина али су људи још увијек контролисали њихов рад. Аутоматизацијом се отишло корак даље јер се постигло да машине саме управљају својим радом. Дакле, у процесу аутоматизације је рад машина замијенио и физички и ментални рад људи.

Појам „аутоматизација" долази из грчког језика од ријечи аутоматос (гр. αὐτόματος) што у преводу зачи оно што се само креће. У англосаксонској литератури појам аутоматизације има двије одреднице – *automatization* и *automation*. Одредница *automatization* односи се на аутоматизовање процеса и система код којих се

управљање врши механичким путем. Овај начин аутоматизације је карактеристичан за крај 19. и почетак 20. вијека када се појављују први струг чији је рад био контролисан механичким путем и прва покретна трака која се користила у аутомобилској индустрији. Развој електронике и теорије управљања системима с почетка прошлог вијека допринио је развоју нових начина аутоматизације који су били базирани на електронским компонентама. Тридесетих година 20. вијека уводи се одредница на енглеском језику *automation* која је скраћени облик одреднице *automatization* а која се односи на крајњи резултат аутоматизовања или стање у којем систем функционише аутоматски, без интервенције људи. Ова одредница се дефинише и као аутоматски рад или процес аутоматизоване производње опипљивих добара у коме се рад контролише аутоматском регулацијом или управљањем у повратној спрези. Уз појам аутоматизације везан је и појам аутоматике (енгл. *automatics*) која се односи на техничку и научну дисциплину која се бави теоријом система аутоматског управљања и техничким аспектима и принципима њихове изградње.

Иако аутоматизација у савременом смислу те ријечи егзистира од средине прошлог вијека, идеја да се свакодневне активности људи и послови, посебно они који се понављају и који су заморни и досадни, замијене радом различитих справа или уређаја, присутна је хиљадама година. Људи су од давнина покушавали да управљају системима и процесима који су им били познати и да исте аутоматизују. Примјери тога налазе се још у античком периоду и средњем вијеку када су, посматрањем природних појава и процеса, такви системи и настајали. И поред тога што у то доба није постојао адекватан математички апарат за опис ових система, они су одлично функционисали и служили сврси дуге временске периоде. Данас се и најсложенији системи могу математички описати и могу се дефинисати опште смјернице за њихову анализу, синтезу и управљање. Интересантно је да су класични системи аутоматског управљања базирани управо на овима из античког доба.

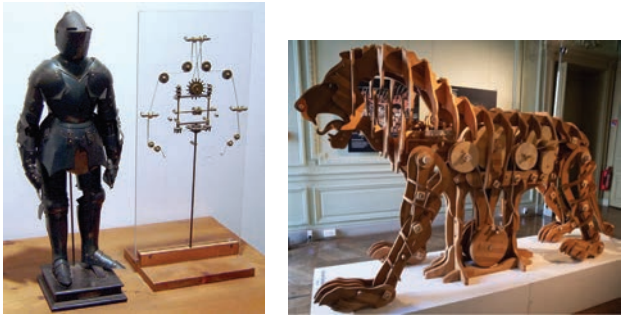
Један од најранијих примјера управљања је управљање воденим сатом, клепсидром, које је осмислио Ктесибије Александријски у трећем вијеку прије нове ере. Сат је радио на принципу повратне спреге, мјерио је вријеме регулишући ниво воде у посуди, односно проток воде која из ње излази. Овај сат је био у употреби као најпрецизнија справа за мјерење времена све до седамнаестог вијека када је Кристијан Хајгенс изумио сат са клатном. Отприлике три вијека након Ктесибија Александријског, Херон је у својој расправи „Пнеуматика" описао читав низ механичких справа чији је рад био заснован на коришћењу ваздуха, водене паре и притиска, а посебно су интересантни аутомат за сипање воде који је радио на принципу убацивања новчића, позориште лутака које је било аутоматизовано да самостално ради двадесетак минута, Херонова кугла (еолипиле) која се сматра



Слика 1.1. а) Ктесибијева клепсидра, б) еолипиле, в) Херонов аутомат за сипање воде, г) вјетрењача, д) водена пумпа

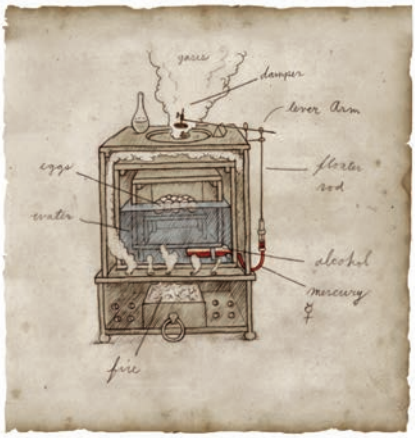
првом парном машином, вјетрењача која је снагом вјетра покретала оргуље и водена пумпа. Слични примјери из античког доба се сусрећу и у Кини, Индији, Арабији.

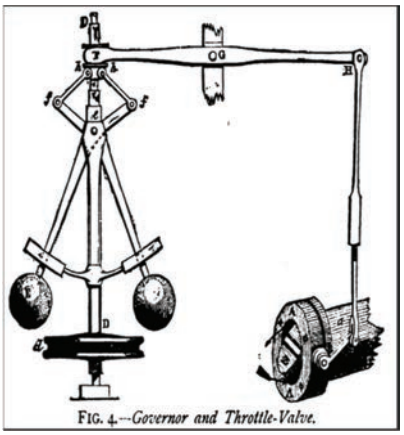
Знања о управљању и регулацији стечена у античком добу углавном су остала сачувана у дјелима арапских научника и хроничара, а западни свијет их је поново открио на самом крају ренесансног периода. Велики број аутоматизованих уређаја је у средњем вијеку коришћен за забаву (нпр. фигурице које саме плешу), а њихов принцип рада је углавном био базиран на отвореној спрези. Овдје се могу уврстити и изуми Леонарда да Винчија, као што је робот који је могао да сједи, маше рукама, помјера главу, отвара и затвара уста, или механички лав који је могао да се покреће.



Слика 1.2. Робот и механички лав Леонарда да Винчија

У седамнаестом вијеку се биљежи појава првог регулатора температуре. Корнелијус Дребел је изумио термостат да би, у пећи коју је конструисао, одржавао константну температуру, а за регулацију је користио повратну спрегу. Након овога, у осамнаестом вијеку, Џејмс Ват је, усавршавајући парну пумпу Томаса Њукомена, конструисао центрифугални регулатор броја обртаја који ће касније користити у својој парној машини. Оваква парна машина се сматра првим управљачким системом са повратном спрегом који је коришћен у индустрији, а њено откриће означило је појаву прве индустријске револуције.





Слика 1.3. Дребелова пећ са термостатом и Ватов регулатор

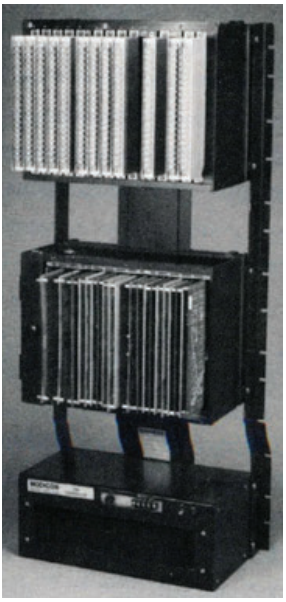
Крајем деветнаестог и почетком двадесетог вијека управљање процесима у повратној спрези се углавном односило на регулацију температуре, притиска, нивоа течности, брзине ротационих машина, напона, струје, фреквенције. Развој војне индустрије, бродоградње, саобраћаја и слично условили су да се интензивира рад на управљању сложеним хидрауличним, пнеуматским и парним системима. Из овог периода датирају први сервомотори, релејна техника, жироскопи, ПИД (пропорционално-интегрално-диференцијални) регулатори и друго, али није постојала теоријска основа која би дала опште смјернице за анализу и синтезу управљачких система базираних на овим компонентама. Почетак двадесетог вијека је означен као почетак друге индустријске револуције, када се у масовној производњи користи електрична енергија.

Од тридесетих година двадесетог вијека креће тзв. класични период у управљању. Најзначајнија појава тог периода је рад Никвиста (Harry Theodor Nyqvist) у коме износи принципе негативне повратне спреге који се могу примијенити на практично сваки систем. У његовим и радовима Бодеа, Николса, Теодорчика, Ивенса и других постављени су чврсти темељи анализе и синтезе

динамичких система у временском и фреквенцијском домену, те су предложене разне методе за анализу стабилности система са повратном спрегом.

Педесете године двадесетог вијека узимају се као период настанка дигиталног управљања. Развој дигиталних рачунара омогућио је да се рачунари користе у управљању системима, поготово оним сложенијим. Први такви системи су користили рачунаре само за надгледање рада система док је управљање реализовано на класичан начин. Крајем шездесетих година дизајнирани су специјализовани рачунари у којима су имплементирани дискретни управљачки алгоритми. Седамдесетих година замијенили су их микрорачунари. У овом периоду јављају се први роботи употријебљени у индустрији (*Unimate* 1962. године), први

а)



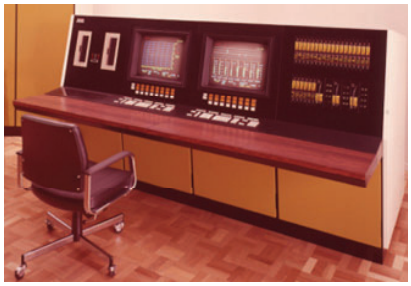
б)



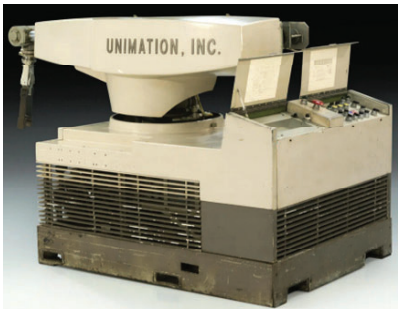
в)



г)



д)



Слика 1.4. а) Modicon model 084, б) IBM 5531, в) Honeywell TDC 2000, г) Yokogawa CENTUM, д) Unimate

програмабилни логички контролери (*Modicon model 084* из 1968. године), а у комуникацијама се развија етернет технологија што је заједно наговијестило појаву мрежних управљачких структура. Седамдесете године су означиле почетак треће индустријске револуције у којој је производња аутоматизована широком употребом рачунара, електронике и електронских уређаја. Почетком осамдесетих година у индустрији се користе први индустријски рачунари (IBM 5531 *Industrial Computer*).

Као први облик аналогног управљања преко мреже наводи се систем за управљање летом авиона (аутопилот) који је педесетих година двадесетог вијека уграђен у бомбардер *Avro Vulcan*. Седамдесетих година је у Совјетском Савезу пројектован дигитални аутопилот за *Сухой Т-4*, док је NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) такав систем први пут користила за своју летјелицу *F-8C Crusader*. Након овога, представљени су први дистрибуисани управљачки системи *Honeywell* TDC2000 (*Total Distributed Control 2000*) и *Yokogawa* CENTUM. У исто вријеме реализовано је даљинско управљање системима које је било базирано на коришћењу умрежених управљачких система. Концепт мрежног управљања је у овом периоду и осамдесетих година прошлог вијека нашао своју примјену у аутоматизацији и управљању индустријским системима када су различити произвођачи за своје умрежене индустријске системе развили различите комуникационе стратегије (PROFIBUS, Fieldbus, DeviceNet). Комуникациони протоколи који су при томе коришћени међусобно су били некомпатибилни, што је у великој мјери ограничавало њихову употребу. Етернет технологија, која је стандардизована осамдесетих година, пружила је могућност за превазилажење ових проблема.

Деведесетих година двадесетог вијека се јавља WWW (*World Wide Web*) технологија која је омогућила употребу HTTP (*Hyper Text Transfer Protocol*) протокола, односно интернета, у комуникацији умрежених уређаја. Како је ријеч о стандардизованој технологији, прихваћена је и у управљању системима, а пружила је додатне могућности за даљинско надгледање и управљање системима путем интернет претраживача.

У посљедњих двадесетак година интензивно се ради и на развоју бежичних умрежених управљачких система чиме се постижу још једноставнији приступ и управљање истим. Данас су истраживања у области умрежених управљачких система оријентисана на развој дистрибуисаних умрежених управљачких система чији је циљ да се пројектују мрежне структуре и компоненте које ће интегрисати дистрибуисане сензоре, актуаторе и управљачке алгоритме преко комуникационе мреже и на тај начин омогућити управљање у реалном времену. С тим у вези, посљедњих година је забиљежен развој нових концепата мрежног управљања који је условљен брзим развојем интернета ствари, као и техника које користе концепт управљања у облаку и управљања базираног на технологијама рачунарства на ивици мреже и у магли. Посебно су значајни роботски системи који у свом раду користе

нове концепте управљања, тако да се данас улажу велики напори како би се реализовале замисли роботских система у облаку и концепта интернета роботских ствари. Технолошка и техничка открића са краја двадесетог и почетка двадесет првог вијека омогућила су нову, дигиталну, трансформацију индустријске производње и означила су појаву четврте индустријске револуције окарактерисане појмом Индустрија 4.0. У задњих неколико година, технологијама Индустрије 4.0 и напредним технологијама попут вјештачке интелигенције, виртуелне и проширене реалности, мрежа пете генерације и хаптичких система, развија се концепт Индустрије 5.0 који у центар индустријских процеса враћа људе који су у знатној мјери били потиснути у претходним концептима. Дигитална трансформација у индустријској аутоматизацији је у знатној мјери обиљежила и развој роботике који се у овом тренутку креће у правцу реализације колаборативне роботике која треба да уједини људе и роботе у постизању заједничких циљева.



Слика 1.5. Паметна фабрика у Индустрији 4.0 (горе) и колаборација људи и машина у Индустрији 5.0 (доље)