



**NATIONAL AND KAPODISTRIAN UNIVERSITY OF ATHENS**

**SCHOOL OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF DIGITAL INDUSTRY TECHNOLOGIES**

**BSc THESIS**

**Design and Implementation in Programmable Logic  
Controllers of a Supervisor Control scheme for a small-scale  
industrial system**

**Thomas Mitros**

**Supervisor: Dimitrios G. Fragkoulis, Assistant Professor**

**PSACHNA  
February 2025**



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Σχεδίαση και Υλοποίηση σε Προγραμματιζόμενους Λογικούς  
Ελεγκτές σχήματος Εποπτικού Ελέγχου για βιομηχανικό  
σύστημα μικρής κλίμακας**

**Θωμάς Μήτρος**

**Επιβλέπων: Δημήτριος Γ. Φραγκούλης, Επίκουρος Καθηγητής**

**ΨΑΧΝΑ  
Φεβρουάριος 2025**

**BSc THESIS**

Design and Implementation in Programmable Logic Controllers of a Supervisor Control scheme for a small-scale industrial system

**Thomas Mitros**

**S.N.:** 1117201900137

**SUPERVISOR:** Dimitrios G. Fragkoulis, Assistant Professor

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Σχεδίαση και Υλοποίηση σε Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές σχήματος  
Εποπτικού Ελέγχου για βιομηχανικό σύστημα μικρής κλίμακας

**Θωμάς Μήτρος**

**A.M.: 1117201900137**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δημήτριος Γ. Φραγκούλης, Επίκουρος Καθηγητής**

## **ABSTRACT**

In the present thesis, the model of a small-scale industrial system, that has attracted the interest of the literature, will be presented, using finite deterministic automata. The system consists of a set of interconnected manufacturing machines. Based on the operational and safety specifications of the literature, a distributed supervisory control scheme will be designed. The characteristics of the controlled system will be presented emphasizing on avoiding deadlock. The proposed supervisory scheme will be implemented in programmable logic controllers using Ladder diagrams.

**SUBJECT AREA:** Industrial Control, Cyber-Physical Systems

**KEYWORDS:** Distributed Control, Industrial Systems, Discrete Event Systems

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή θα παρουσιαστεί το μοντέλο ενός βιομηχανικού συστήματος μικρής κλίμακας που έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της βιβλιογραφίας, με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων. Το σύστημα αποτελείται από ένα σύνολο διασυνδεδεμένων μηχανών κατεργασίας. Με βάση τις προδιαγραφές λειτουργίας και ασφαλείας της βιβλιογραφίας θα σχεδιαστεί ένα σχήμα εποπτικού ελέγχου κατανεμημένης αρχιτεκτονικής. Θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά του ελεγχόμενου συστήματος με έμφαση στην αποφυγή του εγκλωβισμού. Το προτεινόμενο εποπτικό σχήμα θα υλοποιηθεί σε προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές με χρήση διαγραμμάτων Ladder.

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Βιομηχανικός Έλεγχος, Κυβερνοφυσικά Συστήματα

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Κατανεμημένος έλεγχος, Βιομηχανικά συστήματα, Πεπερασμένα ντετερμινιστικά αυτόματα



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>11</b>
1.1 Το βιομηχανικό σύστημα μικρής κλίμακας .....	11
1.2 Μοντέλο των Μηχανών Κατεργασία 1 και 2 .....	12
1.3 Μοντέλο της Μηχανής Συναρμολόγησης .....	14
1.4 Μοντέλο της Μηχανής Συσκευασίας .....	15
<b>2. ΑΣΦΑΛΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ</b> .....	<b>17</b>
2.1 Κανόνες Ασφαλούς Λειτουργίας .....	17
2.2 Κανονικές Γλώσσες Ασφαλούς Λειτουργίας.....	17
2.2.1 Κανονική γλώσσα 1 .....	17
2.2.2 Κανονική γλώσσα 2.....	17
2.2.3 Κανονική γλώσσα 3.....	18
<b>3. ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΣ ΕΠΟΠΤΙΚΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ</b> .....	<b>19</b>
3.1 Σχεδιασμός Επόπτη για την Κανονική Γλώσσα 1 .....	19
3.2 Σχεδιασμός Επόπτη για την Κανονική Γλώσσα 2.....	20
3.3 Σχεδιασμός Επόπτη για την Κανονική Γλώσσα 3.....	21
<b>4. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΟΠΤΩΝ ΜΕ LADDER DIAGRAMS</b> .....	<b>22</b>
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	<b>26</b>
<b>REFERENCES - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>27</b>



## Λίστα Σχημάτων

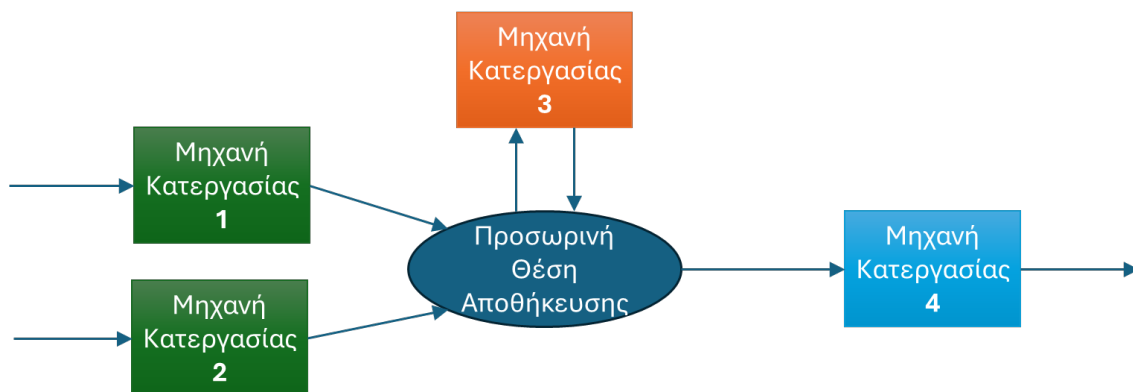
Σχήμα 1: Το βιομηχανικό σύστημα μικρής κλίμακας.....	11
Σχήμα 2: Διάγραμμα κατάστασης του σταθμού παραγωγής 1 .....	13
Σχήμα 3: Διάγραμμα κατάστασης του σταθμού παραγωγής 2 .....	14
Σχήμα 4: Διάγραμμα κατάστασης της μηχανής συναρμολόγησης.....	15
Σχήμα 5: Διάγραμμα κατάστασης της μηχανής συσκευασίας.....	16
Σχήμα 6: Επόπτης Κανονικής Γλώσσας 1.....	19
Σχήμα 7: Επόπτης Κανονικής Γλώσσας 2.....	20
Σχήμα 8: Επόπτης Κανονικής Γλώσσας 3.....	21
Σχήμα 9: Υλοποίηση Επόπτη Κανονικής Γλώσσας 1 .....	22
Σχήμα 10: Υλοποίηση Επόπτη Κανονικής Γλώσσας 2 .....	23
Σχήμα 11: Υλοποίηση Επόπτη Κανονικής Γλώσσας 3 .....	24



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Το βιομηχανικό σύστημα μικρής κλίμακας

Πολλά πραγματικά συστήματα μοιράζονται το χαρακτηριστικό ότι οδηγούνται από συμβάντα, δηλαδή η εξέλιξή τους στο χρόνο καθοδηγείται από την εμφάνιση ασύγχρονων σημάτων, που ονομάζονται συμβάντα, σε αντίθεση με συμπεριφορές που καθοδηγούνται από το χρόνο ([1]-[10]). Τα συστήματα που μοιράζονται αυτά τα χαρακτηριστικά ονομάζονται Συστήματα Διακριτών Συμβάντων - Discrete Event Systems (DES) ([11]-[19]) και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τομέων, όπως η ρομποτική, η παραγωγή, η εφοδιαστική αλυσίδα κ.α. Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί ένα βιομηχανικό σύστημα μικρής κλίμακας της βιβλιογραφίας [20], καθώς και η μοντελοποίηση του με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων τα οποία αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους μοντελοποίησης στο πλαίσιο των DES. Το παρόν σύστημα καθώς και πολλές παραλλαγές του χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά στη βιβλιογραφία για την μοντελοποίηση βιομηχανικών συστημάτων [20]-[23]. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται μία αφαιρετική απεικόνιση του βιομηχανικού συστήματος μικρής κλίμακας.



Σχήμα 1: Το βιομηχανικό σύστημα μικρής κλίμακας

Το βιομηχανικό σύστημα αποτελείται από τέσσερις μηχανές κατεργασίας και μία προσωρινή θέση αποθήκευσης. Οι Μηχανές κατεργασίας 1 και 2 παίρνουν τα προϊόντα από τις δύο εισόδους του συστήματος και αποστέλλουν τα κατεργασμένα προϊόντα στην προσωρινή θέση αποθήκευσης. Η Μηχανή 1 κατεργάζεται προϊόντα τύπου 1 και η Μηχανή 2 κατεργάζεται προϊόντα τύπου 2. Η Μηχανή κατεργασίας 3 είναι μία μηχανή συναρμολόγησης η οποία στέλνει και παίρνει προϊόντα τύπου 2 προς και από την προσωρινή θέση αποθήκευσης. Τέλος, η Μηχανή κατεργασίας 4 είναι μία μηχανή

συσκευασίας η οποία παίρνει τα προϊόντα από την προσωρινή θέση αποθήκευσης και τα αποστέλλει στην έξοδο του συστήματος. Το μοντέλο των μηχανών κατεργασίας θα παρουσιαστούν στη μορφή πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων.

## 1.2 Μοντέλο των Μηχανών Κατεργασία 1 και 2

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το μοντέλο της Μηχανής Κατεργασίας 1 με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων σε μορφή 6-αδας ([24]-[26]). Επομένως ισχύει ότι

$$\mathbf{G}_{M,1} = (\mathbb{Q}_{M,1}, \mathbb{E}_{M,1}, f_{M,1}, \mathbb{H}_{M,1}, x_{M,1,0}, \mathbb{Q}_{M,1,m}).$$

Το σύνολο των καταστάσεων είναι

$$\mathbb{Q}_{M,1} = \{q_{M,1,1}, q_{M,1,2}\}.$$

Η κατάσταση  $q_{M,1,1}$  περιγράφει την περίπτωση που δεν υπάρχει προϊόν τύπου 1 στη μηχανή και η μηχανή είναι σε αναμονή. Η κατάσταση  $q_{M,1,2}$  περιγράφει την περίπτωση που η μηχανή έχει ένα προϊόν τύπου 1.

Το αλφάβητο είναι

$$\mathbb{E}_{M,1} = \{e_{M,1,1}, e_{M,1,2}\}.$$

Το συμβάν  $e_{M,1,1}$  είναι η εντολή προς τη Μηχανή κατεργασίας 1 να εκκινήσει την κατεργασία γιατί ένα προϊόν τύπου 1 τοποθετήθηκε. Το συμβάν  $e_{M,1,2}$  είναι το σήμα ότι η κατεργασία και μεταφορά του προϊόντος στη προσωρινή θέση ολοκληρώθηκε. Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι  $\mathbb{E}_{M,1,c} = \{e_{M,1,1}\}$ . Το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι  $\mathbb{E}_{M,1,uc} = \{e_{M,1,2}\}$ .

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$f_{M,1}(q_{M,1,1}, e_{M,1,2}) = q_{M,1,2}, \quad f_{M,1}(q_{M,1,2}, e_{M,1,2}) = q_{M,1,1}.$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων κάθε κατάστασης είναι

$$\mathbb{H}_{M,1}(q_{M,1,1}) = \{e_{M,1,1}\}, \quad \mathbb{H}_{M,1}(q_{M,1,2}) = \{e_{M,1,2}\}.$$

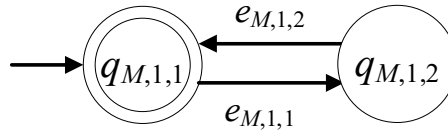
Η αρχική κατάσταση είναι  $x_{M,1,0} = q_{M,1,1}$  και το σύνολο των σημαδεμένων καταστάσεων είναι  $\mathbb{Q}_{M,1,m} = \{q_{M,1,1}\}$ . Η κλειστή συμπεριφορά είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_{M,1}) = \overline{(e_{M,1,1}e_{M,1,2})^*}.$$

Η σημαδεμένη συμπεριφορά είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{M,1}) = (e_{M,1,1}e_{M,1,2})^*$$

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται το διάγραμμα κατάστασης της Μηχανής κατεργασίας 1.



**Σχήμα 2: Διάγραμμα κατάστασης του σταθμού παραγωγής 1**

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το μοντέλο της Μηχανής Κατεργασίας 2 στη μορφή των πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων. Επομένως ισχύει ότι

$$\mathbf{G}_{M,2} = (\mathbb{Q}_{M,2}, \mathbb{E}_{M,2}, f_{M,2}, \mathbb{H}_{M,2}, x_{M,2,0}, \mathbb{Q}_{M,2,m}).$$

Το σύνολο των καταστάσεων είναι

$$\mathbb{Q}_{M,2} = \{q_{M,2,1}, q_{M,2,2}\}.$$

Η κατάσταση  $q_{M,2,1}$  περιγράφει την περίπτωση που δεν υπάρχει προϊόν τύπου 2 στη μηχανή και η μηχανή είναι σε αναμονή. Η κατάσταση  $q_{M,2,2}$  περιγράφει την περίπτωση που η μηχανή έχει ένα προϊόν τύπου 2.

Το αλφάβητο είναι

$$\mathbb{E}_{M,2} = \{e_{M,2,1}, e_{M,2,2}\}.$$

Το συμβάν  $e_{M,2,1}$  είναι η εντολή προς τη Μηχανή κατεργασίας 2 να εκκινήσει την κατεργασία γιατί ένα προϊόν τύπου 2 τοποθετήθηκε. Το συμβάν  $e_{M,2,2}$  είναι το σήμα ότι η κατεργασία και μεταφορά του προϊόντος τύπου 2 στη προσωρινή θέση ολοκληρώθηκε. Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι  $\mathbb{E}_{M,2,c} = \{e_{M,2,1}\}$ . Το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι  $\mathbb{E}_{M,2,uc} = \{e_{M,2,2}\}$ .

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$f_{M,2}(q_{M,2,1}, e_{M,2,2}) = q_{M,2,2}, f_{M,2}(q_{M,2,2}, e_{M,2,2}) = q_{M,2,1}.$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων κάθε κατάστασης είναι

$$\mathbb{H}_{M,2}(q_{M,2,1}) = \{e_{M,2,1}\}, \quad \mathbb{H}_{M,2}(q_{M,2,2}) = \{e_{M,2,2}\}.$$

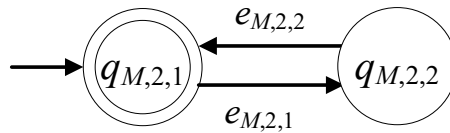
Η αρχική κατάσταση είναι  $x_{M,2,0} = q_{M,2,1}$  και το σύνολο των σημαδεμένων καταστάσεων είναι  $\mathbb{Q}_{M,2,m} = \{q_{M,2,1}\}$ . Η κλειστή συμπεριφορά είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_{M,2}) = \overline{(e_{M,2,1}e_{M,2,2})^*}.$$

Η σημαδεμένη συμπεριφορά είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{M,2}) = (e_{M,2,1}e_{M,2,2})^*.$$

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται το διάγραμμα κατάστασης της Μηχανής κατεργασίας 2.



Σχήμα 3: Διάγραμμα κατάστασης του σταθμού παραγωγής 2

### 1.3 Μοντέλο της Μηχανής Συναρμολόγησης

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το μοντέλο της Μηχανής Συναρμολόγησης με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων σε μορφή 6-αδας ([24]-[26]). Επομένως ισχύει ότι

$$\mathbf{G}_A = (\mathbb{Q}_A, \mathbb{E}_A, f_A, \mathbb{H}_A, x_{A,0}, \mathbb{Q}_{A,m}).$$

Το σύνολο των καταστάσεων είναι

$$\mathbb{Q}_A = \{q_{A,1}, q_{A,2}\}.$$

Η κατάσταση  $q_{A,1}$  περιγράφει την περίπτωση που δεν υπάρχει προϊόν τύπου 2 στη μηχανή συναρμολόγησης και η μηχανή είναι σε αναμονή. Η κατάσταση  $q_{A,2}$  περιγράφει την περίπτωση που η μηχανή έχει ένα προϊόν τύπου 2.

Το αλφάβητο είναι

$$\mathbb{E}_A = \{e_{A,1}, e_{A,2}\}.$$

Το συμβάν  $e_{A,1}$  είναι η εντολή προς τη μηχανή συναρμολόγησης να εκκινήσει την συναρμολόγηση ενός προϊόντος τύπου 2. Το συμβάν  $e_{A,2}$  είναι το σήμα ότι η

συναρμολόγηση και μεταφορά του προϊόντος τύπου 2 στη προσωρινή θέση ολοκληρώθηκε. Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι  $\mathbb{E}_{A,c} = \{e_{A,1}\}$ . Το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι  $\mathbb{E}_{A,uc} = \{e_{A,2}\}$ .

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$f_A(q_{A,1}, e_{A,2}) = q_{A,2}, f_A(q_{A,2}, e_{A,1}) = q_{A,1}.$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων κάθε κατάστασης είναι

$$\mathbb{H}_A(q_{A,1}) = \{e_{A,1}\}, \mathbb{H}_A(q_{A,2}) = \{e_{A,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση είναι  $x_{A,0} = q_{A,1}$  και το σύνολο των σημαδεμένων καταστάσεων είναι

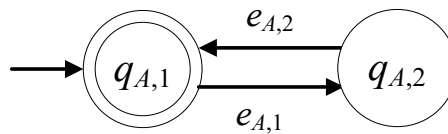
$\mathbb{Q}_{A,m} = \{q_{A,1}\}$ . Η κλειστή συμπεριφορά είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_A) = \overline{(e_{A,1}e_{A,2})^*}.$$

Η σημαδεμένη συμπεριφορά είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_A) = (e_{A,1}e_{A,2})^*.$$

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται το διάγραμμα κατάστασης της μηχανής συναρμολόγησης.



Σχήμα 4: Διάγραμμα κατάστασης της μηχανής συναρμολόγησης

#### 1.4 Μοντέλο της Μηχανής Συσκευασίας

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το μοντέλο της Μηχανής Συσκευασίας με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων σε μορφή 6-αδας ([24]-[26]). Επομένως ισχύει ότι

$$\mathbf{G}_P = (\mathbb{Q}_P, \mathbb{E}_P, f_P, \mathbb{H}_P, x_{P,0}, \mathbb{Q}_{P,m}).$$

Το σύνολο των καταστάσεων είναι

$$\mathbb{Q}_P = \{q_{P,1}, q_{P,2}\}.$$

Η κατάσταση  $q_{P,1}$  περιγράφει την περίπτωση που δεν υπάρχει προϊόν στη μηχανή συσκευασίας και η μηχανή είναι σε αναμονή. Η κατάσταση  $q_{P,2}$  περιγράφει την περίπτωση που η μηχανή συσκευασίας έχει ένα προϊόν.

Το αλφάβητο είναι

$$\mathbb{E}_P = \{e_{P,1}, e_{P,2}\}.$$

Το συμβάν  $e_{P,1}$  είναι η εντολή προς τη μηχανή συσκευασίας να εκκινήσει τη συσκευασία ενός προϊόντος. Το συμβάν  $e_{P,2}$  είναι το σήμα ότι η συσκευασία και μεταφορά του προϊόντος στη προσωρινή θέση ολοκληρώθηκε. Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι  $\mathbb{E}_{P,c} = \{e_{P,1}\}$ . Το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι  $\mathbb{E}_{P,uc} = \{e_{P,2}\}$ .

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$f_P(q_{P,1}, e_{P,2}) = q_{P,2}, \quad f_P(q_{P,2}, e_{P,1}) = q_{P,1}.$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων κάθε κατάστασης είναι

$$\mathbb{H}_P(q_{P,1}) = \{e_{P,1}\}, \quad \mathbb{H}_P(q_{P,2}) = \{e_{P,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση είναι  $x_{P,0} = q_{P,1}$  και το σύνολο των σημαδεμένων καταστάσεων είναι

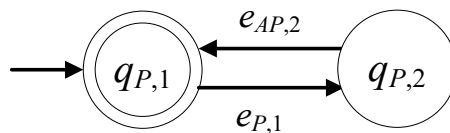
$\mathbb{Q}_{P,m} = \{q_{P,1}\}$ . Η κλειστή συμπεριφορά είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_P) = \overline{(e_{P,1}e_{P,2})^*}.$$

Η σημαδεμένη συμπεριφορά είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_P) = (e_{P,1}e_{P,2})^*.$$

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται το διάγραμμα κατάστασης της μηχανής συσκευασίας.



Σχήμα 5: Διάγραμμα κατάστασης της μηχανής συσκευασίας



## 2. ΑΣΦΑΛΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

### 2.1 Κανόνες Ασφαλούς Λειτουργίας

Το σύστημα μπορεί να κατεργαστεί δύο τύπους προϊόντων, τα προϊόντα τύπου 1 και τύπου 2. Για την κατεργασία των προϊόντων τύπου 1 απαιτείται η κατεργασία τους από τη Μηχανή Κατεργασίας 1 και έπειτα η συσκευασία τους από τη Μηχανή 4. Για την κατεργασία των προϊόντων τύπου 2 απαιτείται η κατεργασία τους από τη Μηχανή Κατεργασίας 2, η συναρμολόγηση τους από τη Μηχανή 3 και τέλος συσκευασία τους από τη Μηχανή 4. Μετά την κατεργασία των προϊόντων, τοποθετούνται στην προσωρινή θέση η οποία έχει χωρητικότητα ενός προϊόντος. Έτσι, η παραπάνω ροές παραγωγής μπορούν να παρουσιαστούν στη μορφή τριών κανόνων ασφαλούς λειτουργίας, ως εξής

**Κανόνας 1:** Μετά την ολοκλήρωση της κατεργασίας των προϊόντων τύπου 1 από τη Μηχανή 1 μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο η μηχανή συσκευασίας.

**Κανόνας 2:** Μετά την ολοκλήρωση της κατεργασίας των προϊόντων τύπου 2 από τη Μηχανή 2 μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο η μηχανή συναρμολόγησης.

**Κανόνας 3:** Μετά την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης των προϊόντων τύπου 2 από τη Μηχανή 3 μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο η μηχανή συσκευασίας.

### 2.2 Κανονικές Γλώσσες Ασφαλούς Λειτουργίας

#### 2.2.1 Κανονική γλώσσα 1

Η κανονική γλώσσα που αντιστοιχεί στον Κανόνα 1 είναι της μορφής:

$$\mathbb{K}_{D,1} = \left( (e_{M,1,1} + e_{M,2,1} + e_{P,1} + e_{A,1})^* e_{M,1,2} e_{P,1} \right)^*.$$

Είναι προφανές ότι η γλώσσα  $\mathbb{K}_{D,1}$  είναι ελέγξιμη ως προς το αυτόματο

$$\mathbf{G}_{M,1} \parallel \mathbf{G}_{M,2} \parallel \mathbf{G}_A \parallel \mathbf{G}_P.$$

#### 2.2.2 Κανονική γλώσσα 2

Η κανονική γλώσσα που αντιστοιχεί στον Κανόνα 2 είναι της μορφής:

$$\mathbb{K}_{D,2} = \left( (e_{M,1,1} + e_{M,2,1} + e_{A,1} + e_{P,1})^* e_{M,2,2} e_{A,1} \right)^*.$$

Είναι προφανές ότι η γλώσσα  $\mathbb{K}_{D,2}$  είναι ελέγξιμη ως προς το αυτόματο  $\mathbf{G}_{M,1} \parallel \mathbf{G}_{M,2} \parallel \mathbf{G}_A \parallel \mathbf{G}_P$ .

### 2.2.3 Κανονική γλώσσα 3

Η κανονική γλώσσα που αντιστοιχεί στον Κανόνα 3 είναι της μορφής:

$$\mathbb{K}_{D,3} = \left( (e_{M,1,1} + e_{M,2,1} + e_{A,1} + e_{P,1})^* e_{A,2} e_{P,1} \right)^* .$$

Είναι προφανές ότι η γλώσσα  $\mathbb{K}_{D,3}$  είναι ελέγξιμη ως προς το αυτόματο  $\mathbf{G}_{M,1} \parallel \mathbf{G}_{M,2} \parallel \mathbf{G}_A \parallel \mathbf{G}_P$ .

### 3. ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΣ ΕΠΟΠΤΙΚΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ

#### 3.1 Σχεδιασμός Επόπτη για την Κανονική Γλώσσα 1

Ο επόπτη  $S_1$  υλοποιεί τη γλώσσα  $\mathbb{K}_{D,1}$  σύμφωνα με [27]-[40]:

$$S_1 = (\mathbb{Q}_{S,1}, \mathbb{E}_{S,1}, f_{S,1}, \mathbb{H}_{S,1}, x_{S,1,0}, \mathbb{Q}_{S,1,m}).$$

Οι καταστάσεις του επόπτη είναι  $\mathbb{Q}_{S,1} = \{q_{S,1,1}, q_{S,1,2}\}$ . Το αλφάβητο του επόπτη είναι  $\mathbb{E}_{S,1} = \{e_{M,1,1}, e_{M,1,2}, e_{M,2,1}, e_{P,1}, e_{A,1}\}$ . Η αρχική κατάσταση είναι  $x_{S,1,0} = q_{S,1,1}$ . Οι σημαδεμένες καταστάσεις είναι  $\mathbb{Q}_{S,1,m} = \mathbb{Q}_{S,1}$ . Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$f_{S,1}(q_{S,1,1}, e_{M,1,1}) = q_{S,1,1}, f_{S,1}(q_{S,1,1}, e_{M,2,1}) = q_{S,1,1},$$

$$f_{S,1}(q_{S,1,1}, e_{P,1}) = q_{S,1,1}, f_{S,1}(q_{S,1,1}, e_{A,1}) = q_{S,1,1},$$

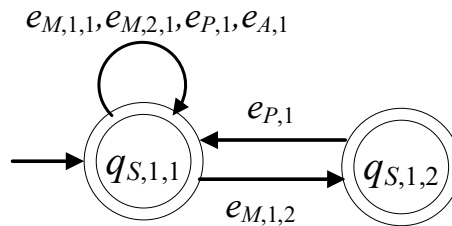
$$f_{S,1}(q_{S,1,1}, e_{M,1,2}) = q_{S,1,2}, f_{S,1}(q_{S,1,2}, e_{P,1}) = q_{S,1,1}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων κάθε κατάστασης είναι

$$\mathbb{H}_{S,1}(q_{S,1,1}) = \mathbb{E}_{S,1}, \mathbb{H}_{S,1}(q_{S,1,2}) = \{e_{P,1}\}.$$

Η σημαδεμένη συμπεριφορά του επόπτη είναι

$\mathbb{L}(S_1) = \mathbb{L}_m(S_1) = \overline{(e_{M,1,1} + e_{M,2,1} + e_{P,1} + e_{A,1})^* e_{M,1,2} e_{P,1}}^*$ . Το διάγραμμα κατάστασης του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Επόπτης Κανονικής Γλώσσας 1

### 3.2 Σχεδιασμός Επόπτη για την Κανονική Γλώσσα 2

Ο επόπτη  $S_2$  υλοποιεί τη γλώσσα  $\mathbb{K}_{D,2}$ :

$$S_2 = (\mathbb{Q}_{S,2}, \mathbb{E}_{S,2}, f_{S,2}, \mathbb{H}_{S,2}, x_{S,2,0}, \mathbb{Q}_{S,2,m}).$$

Οι καταστάσεις του επόπτη είναι  $\mathbb{Q}_{S,2} = \{q_{S,2,1}, q_{S,2,2}\}$ . Το αλφάβητο του επόπτη είναι  $\mathbb{E}_{S,2} = \{e_{M,1,1}, e_{M,2,2}, e_{M,2,1}, e_{P,1}, e_{A,1}\}$ . Η αρχική κατάσταση είναι  $x_{S,2,0} = q_{S,2,1}$ . Οι σημαδεμένες καταστάσεις είναι  $\mathbb{Q}_{S,2,m} = \mathbb{Q}_{S,2}$ . Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$f_{S,2}(q_{S,2,1}, e_{M,1,1}) = q_{S,2,1}, \quad f_{S,2}(q_{S,2,1}, e_{M,2,1}) = q_{S,2,1},$$

$$f_{S,2}(q_{S,2,1}, e_{P,1}) = q_{S,2,1}, \quad f_{S,2}(q_{S,2,1}, e_{A,1}) = q_{S,2,1},$$

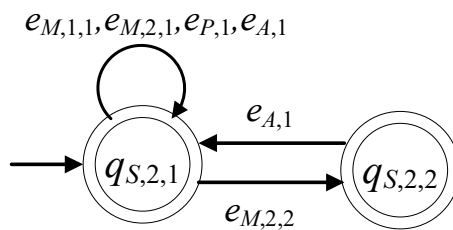
$$f_{S,2}(q_{S,2,1}, e_{M,2,2}) = q_{S,2,2}, \quad f_{S,2}(q_{S,2,2}, e_{A,1}) = q_{S,2,1}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων κάθε κατάστασης είναι

$$\mathbb{H}_{S,2}(q_{S,2,1}) = \mathbb{E}_{S,2}, \quad \mathbb{H}_{S,2}(q_{S,2,2}) = \{e_{A,1}\}.$$

Η σημαδεμένη συμπεριφορά του επόπτη είναι

$\mathbb{L}(S_2) = \mathbb{L}_m(S_2) = \overline{(e_{M,1,1} + e_{M,2,1} + e_{A,1} + e_{P,1})^* e_{M,2,2} e_{A,1}}^*$ . Το διάγραμμα κατάστασης του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Επόπτης Κανονικής Γλώσσας 2

### 3.3 Σχεδιασμός Επόπτη για την Κανονική Γλώσσα 3

Ο επόπτη  $S_3$  υλοποιεί τη γλώσσα  $\mathbb{K}_{D,3}$ :

$$S_3 = (\mathbb{Q}_{S,3}, \mathbb{E}_{S,3}, f_{S,3}, \mathbb{H}_{S,3}, x_{S,3,0}, \mathbb{Q}_{S,3,m}).$$

Οι καταστάσεις του επόπτη είναι  $\mathbb{Q}_{S,3} = \{q_{S,3,1}, q_{S,3,2}\}$ . Το αλφάβητο του επόπτη είναι  $\mathbb{E}_{S,3} = \{e_{M,1,1}, e_{M,2,1}, e_{P,1}, e_{A,1}, e_{A,2}\}$ . Η αρχική κατάσταση είναι  $x_{S,3,0} = q_{S,3,1}$ . Οι σημαδεμένες καταστάσεις είναι  $\mathbb{Q}_{S,3,m} = \mathbb{Q}_{S,3}$ . Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$f_{S,3}(q_{S,3,1}, e_{M,1,1}) = q_{S,3,1}, \quad f_{S,3}(q_{S,3,1}, e_{M,2,1}) = q_{S,3,1},$$

$$f_{S,3}(q_{S,3,1}, e_{P,1}) = q_{S,3,1}, \quad f_{S,3}(q_{S,3,1}, e_{A,1}) = q_{S,3,1},$$

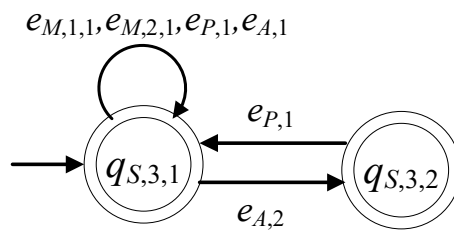
$$f_{S,3}(q_{S,3,1}, e_{A,2}) = q_{S,3,2}, \quad f_{S,3}(q_{S,3,2}, e_{P,1}) = q_{S,3,1}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων κάθε κατάστασης είναι

$$\mathbb{H}_{S,3}(q_{S,3,1}) = \mathbb{E}_{S,3}, \quad \mathbb{H}_{S,3}(q_{S,3,2}) = \{e_{P,1}\}.$$

Η σημαδεμένη συμπεριφορά του επόπτη είναι

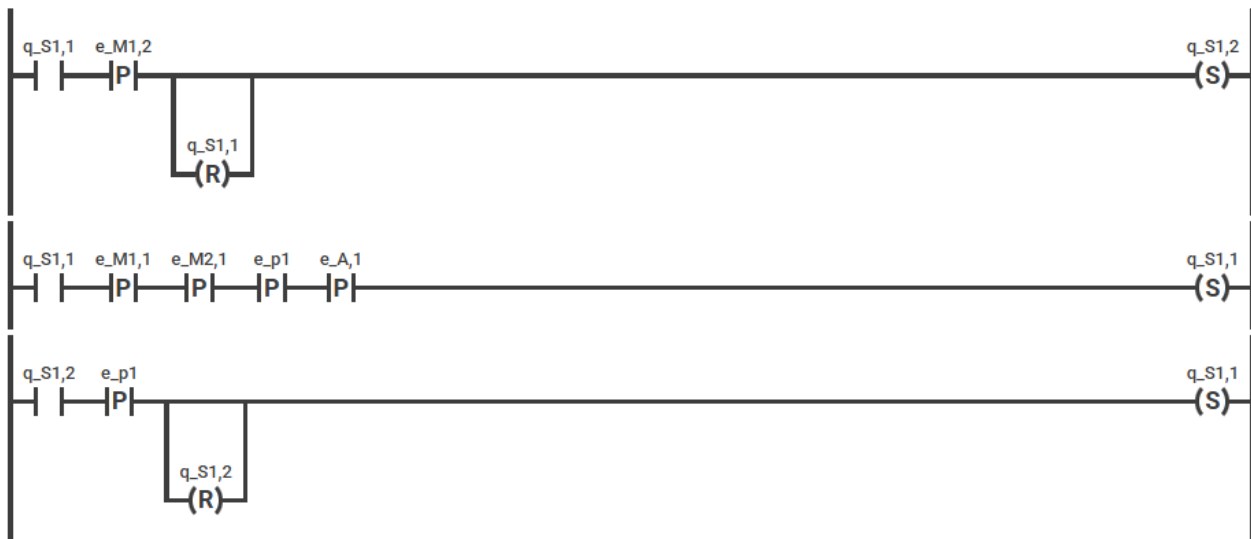
$\mathbb{L}(S_3) = \mathbb{L}_m(S_3) = \overline{(e_{M,1,1} + e_{M,2,1} + e_{A,1} + e_{P,1})^* e_{A,2} e_{P,1}}^*$ . Το διάγραμμα κατάστασης του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Επόπτης Κανονικής Γλώσσας 3

## 4. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΟΠΤΩΝ ΜΕ LADDER DIAGRAMS

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η υλοποίηση των εποπτών που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 3 σε Ladder diagrams για υλοποίηση σε προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (περισσότερα σχετικά με την υλοποίηση εποπτών βλέπε [40]-[45] και αναφορές αυτών). Επομένως, στα Σχήματα 9-11 παρουσιάζεται η υλοποίηση των εποπτών  $S_1$ ,  $S_2$ , και  $S_3$ .



Σχήμα 9: Υλοποίηση Επόπτη Κανονικής Γλώσσας 1

### Rung 1

#### Συνθήκες ενεργοποίησης :

- Οι συνθήκες  $q\_S1,1$  και η  $e\_M1,2$  θα πρέπει να είναι ενεργές.

#### Ενέργεια που εκτελείται:

- Το πηνίο  $q\_S1,2$  τίθεται σε κατάσταση **Set (S)**.
- Το πηνίο  $q\_S1,1$  τίθεται σε κατάσταση **Reset (R)**

### Rung 2

#### Συνθήκες ενεργοποίησης :

- Οι συνθήκες  $q\_S1,1$ ,  $e\_M1,1$ ,  $e\_M2,1$ ,  $e\_p1$  και  $e\_A,1$  θα πρέπει να είναι ενεργές.

#### Ενέργεια που εκτελείται:

- Το πηνίο **q\_S1,1** τίθεται σε κατάσταση **Set (S)**.

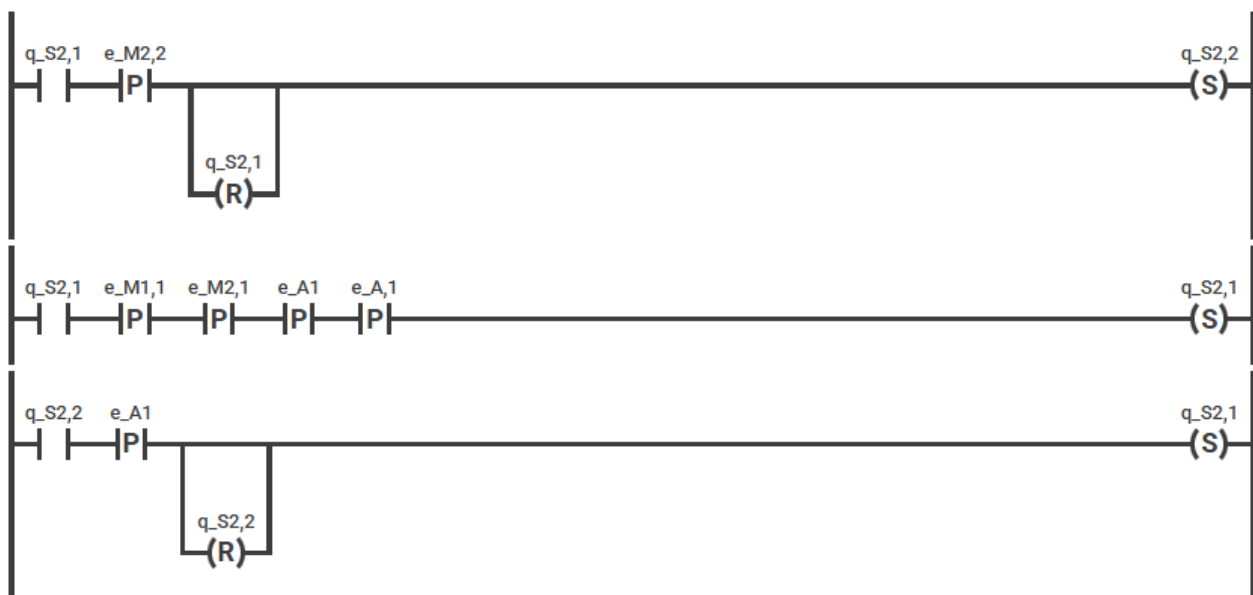
### Rung 3

#### Συνθήκες ενεργοποίησης :

- Οι συνθήκες **q\_S1,2** και η **e\_p1** θα πρέπει να είναι ενεργές.

#### Ενέργεια που εκτελείται:

- Το πηνίο **q\_S1,1** τίθεται σε κατάσταση **Set (S)**.
- Το πηνίο **q\_S1,2** τίθεται σε κατάσταση **Reset (R)**



Σχήμα 10: Υλοποίηση Επόμενη Κανονικής Γλώσσας 2

### Rung 1

#### Συνθήκες ενεργοποίησης :

- Οι συνθήκες **q\_S2,1** και η **e\_M2,2** θα πρέπει να είναι ενεργές.

#### Ενέργεια που εκτελείται:

- Το πηνίο **q\_S2,2** τίθεται σε κατάσταση **Set (S)**.
- Το πηνίο **q\_S2,1** τίθεται σε κατάσταση **Reset (S)**

### Rung 2

#### Συνθήκες ενεργοποίησης :

- Οι συνθήκες **q\_S2,1**, **e\_M1,1**, **e\_M2,1**, **e\_p1** και **e\_A,1** θα πρέπει να είναι ενεργές.

#### Ενέργεια που εκτελείται:

- Το πηνίο **q\_S2,1** τίθεται σε κατάσταση **Set (S)**.

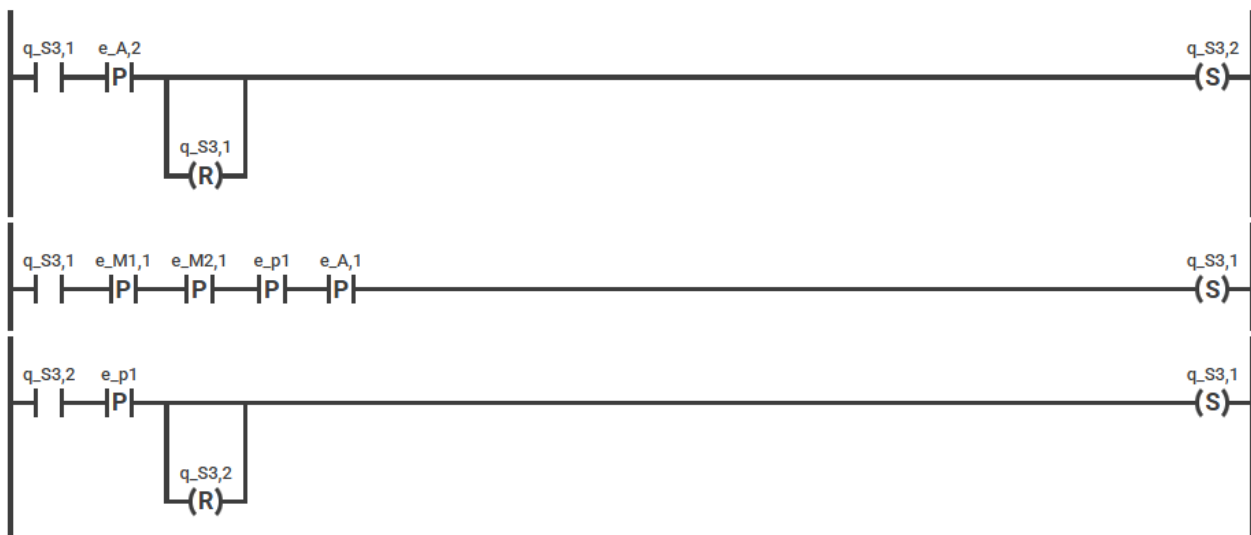
#### Rung 3

##### Συνθήκες ενεργοποίησης :

- Οι συνθήκες **q\_S2,2** και η **e\_A1** θα πρέπει να είναι ενεργές.

#### Ενέργεια που εκτελείται:

- Το πηνίο **q\_S2,1** τίθεται σε κατάσταση **Set (S)**.
- Το πηνίο **q\_S2,2** τίθεται σε κατάσταση **Reset (S)**



Σχήμα 11: Υλοποίηση Επώπτη Κανονικής Γλώσσας 3

#### Rung 1

##### Συνθήκες ενεργοποίησης :

- Οι συνθήκες **q\_S3,1** και η **e\_A,2** θα πρέπει να είναι ενεργές.

#### Ενέργεια που εκτελείται:

- Το πηνίο **q\_S3,2** τίθεται σε κατάσταση **Set (S)**.
- Το πηνίο **q\_S3,1** τίθεται σε κατάσταση **Reset (S)**

#### Rung 2

##### Συνθήκες ενεργοποίησης :



- Οι συνθήκες **q\_S3,1**, **e\_M1,1**, **e\_M2,1**, **e\_p1** και **e\_A,1** θα πρέπει να είναι ενεργές.

**Ενέργεια που εκτελείται:**

- Το πηνίο **q\_S3,1** τίθεται σε κατάσταση **Set (S)**.

**Rung 3**

**Συνθήκες ενεργοποίησης :**

- Οι συνθήκες **q\_S3,2** και η **e\_p1** θα πρέπει να είναι ενεργές.

**Ενέργεια που εκτελείται:**

- Το πηνίο **q\_S3,1** τίθεται σε κατάσταση **Set (S)**.
- Το πηνίο **q\_S3,2** τίθεται σε κατάσταση **Reset (S)**

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα πτυχιακή παρουσιάστηκε το μοντέλο ενός βιομηχανικού συστήματος μικρής κλίμακας που έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της βιβλιογραφίας, με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων. Το σύστημα αποτελείται από ένα σύνολο διασυνδεδεμένων μηχανών κατεργασίας. Με βάση τις προδιαγραφές λειτουργίας και ασφαλείας της βιβλιογραφίας σχεδιάστηκε ένα σχήμα εποπτικού ελέγχου κατανεμημένης αρχιτεκτονικής. Παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά του ελεγχόμενου συστήματος με έμφαση στην αποφυγή του εγκλωβισμού. Το προτεινόμενο εποπτικό σχήμα υλοποιήθηκε σε προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές με χρήση διαγραμμάτων Ladder.

Η περαιτέρω διερεύνηση των ιδιοτήτων τόσο του ελεγχόμενου συστήματος όσο και των επιθυμητών γλωσσών αποτελεί μία επέκταση της παραπάνω εργασίας [46]-[47]. Επίσης, η μελέτη του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη πιθανά σφάλματα ενεργοποιητών και αισθητήρων παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον [48]-[53]. Τέλος, η ενσωμάτωση ευφύων μεθόδων ελέγχου ([54]-[63]) είναι μία ενδιαφέρουσα συνέχεια της εργασίας.

## REFERENCES - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] B. Esmailian, S. Behdad, and B. Wang, "The Evolution and Future of Manufacturing: A Review." *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 39, pp. 79–100, 2016.
- [2] D. Guo, R. Y. Zhong, S. Ling, Y. Rong, and G. Q. Huang "A Roadmap for Assembly 4.0: Self-configuration of Fixed-Position Assembly Islands under Graduation Intelligent Manufacturing System," *International Journal of Production Research*, vol. 58 (15), pp. 4631–4646, 2020.
- [3] A. L. Silva, R. Ribeiro, and M. Teixeira "Modeling and Control of Flexible Context- Dependent Manufacturing Systems," *Information Sciences*, vol. 421, pp. 1–14, 2017.
- [4] A. Jamwal, R. Agrawal, M. Sharma, and A. Giallanza, "Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: A systematic review and future research directions," *Applied Sciences*, vol. 11(12), p. 5725, 2021.
- [5] B. Dafflon, N. Moalla, and Y. Ouzrout, "The challenges, approaches, and used techniques of CPS for manufacturing in Industry 4.0: a literature review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 113, pp. 2395-2412, 2021.
- [6] J. Morgan, M. Halton, Y. Qiao, and J. G. Breslin, "Industry 4.0 smart reconfigurable manufacturing machines," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 59, pp. 481-506, 2021.
- [7] R. Pozzi, T. Rossi, and R. Secchi, "Industry 4.0 technologies: critical success factors for implementation and improvements in manufacturing companies," *Production Planning & Control*, vol. 34(2), pp. 139-158, 2023.
- [8] M. Ghobakhloo, and M. Iranmanesh, "Digital transformation success under Industry 4.0: a strategic guideline for manufacturing SMEs," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 32(8), pp. 1533-1556, 2021.
- [9] P. Kumar, J. Bhamu, and K. Sangwan, "Analysis of barriers to Industry 4.0 adoption in manufacturing organizations: An ISM approach," *Procedia Cirp*, vol. 98, pp. 85-90, 2021.
- [10] J. Leng, D. Wang, W. Shen, X. Li, Q. Liu, and X. Chen, "Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review," *Journal of manufacturing systems*, vol. 60, pp. 119-137, 2021.
- [11] F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, and P. Georgakopoulos, "A Distributed Supervisor Architecture for a General Wafer Production System," *Sensors*, vol. 23, p. 4545, 2023.
- [12] W. M. Wonham and C. Kai, Supervisory control of discrete-event systems, *Springer International Publishing*, 2019.
- [13] C. G. Cassandras, and S. Lafortune, *Introduction to Discrete Event Systems*, 3rd ed.; Springer: Cham, Switzerland, 2021.
- [14] A. D. Vieira, E. A. P. Santos, M. H. de Queiroz, A. B. Leal, A. D. de Paula Neto, and J. E. R. Cury, "A Method for PLC Implementation of Supervisory Control of Discrete Event Systems," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2017, 25, 175–191.
- [15] R. Szipak, M. H. de Queiroz, J. E. R. Cury, "Synthesis and implementation of supervisory control for manufacturing systems under processing uncertainties and time constraints," *IFAC Pap.* 2020, 53, 229–234.
- [16] S. Mohajerani, R. Malik and M. Fabian, "A Framework for Compositional Synthesis of Modular Nonblocking Supervisors," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 59, no. 1, pp. 150-162, 2014.
- [17] K. Cai, and W. M. Wonham, "New results on supervisor localization, with case studies," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 25, pp. 203–226, 2015.
- [18] F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and L. E. Gikas, "Supervisory control for hierarchical switching of communication protocols," *2017 South Eastern European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNM)*, Kastoria, Greece, pp. 1-6, 2017.
- [19] D. G. Fragkoulis, N. D. Kouvakas, F. N. Koumboulis, and N. I. Georgiou, "Modelling and modular supervisory control for the AODV routing protocol," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 169, 154761, 2023.
- [20] L. F. P. Southier, D. Casanova, L. Barbosa, C. Torrico, M. Barbosa and M. Teixeira, "Modelling and control of manufacturing systems subject to context recognition and switching," *International Journal of Production Research*, vol. 61(10), 2023.
- [21] R. Su and W. Murray Wonham, "A Generalized Theory on Supervisor Reduction," *2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Miami, FL, USA, 2018, pp. 3950-3955.
- [22] P. J. Ramadge, and W. M. Wonham, "The Control of Discrete Event Systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 77 (1): 81–98, 1989.
- [23] J. E. R. Cury, M. H. de Queiroz, G. Bouzon, and M. Teixeira, "Supervisory Control of Discrete Event Systems with Distinguishers," *Automatica*, vol. 56, pp. 93–104, 2015.

- [24] F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, M. P. Tzamtzi, and D. Papadopoulos, "Supervisory Control of Multiple Product Flow for a Flexible Manufacturing System," in *Advances in Computational Mechanics and Applications, OES 2023*, vol. 29. Springer, Cham 2023.
- [25] F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and K. A. Ioannou, "Control of Router Nodes in Production Manufacturing Processes," *2018 7th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, Valencia, Spain, pp. 372-377, 2018.
- [26] F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, G. E. Panagiotakis, E. Mavroeidis, "Safe Performance of an Industrial Autonomous Ground Vehicle in the Supervisory Control Framework," *Electronics*, vol. 12(24), p. 5035, 2023.
- [27] J. Komenda, and T. Masopust, "Hierarchical Supervisory Control Under Partial Observation: Normality," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 68, pp. 7286–7298, 2023.
- [28] J. Komenda, T. Masopust, and J. H. van Schuppen, "Synthesis of controllable and normal sublanguages for discrete-event systems using a coordinator," *Syst. Control Lett.*, vol. 60, pp. 492–502, 2011.
- [29] S. Mohajerani, R. Malik, and M. Fabian, "Compositional Synthesis of Supervisors in the Form of State Machines and State Maps," *Automatica*, vol. 76, pp. 277–281, 2017.
- [30] A. Farooqui, F. Hagebring, and M. Fabian, "MIDES: A tool for supervisor synthesis via active learning," *IEEE CASE*, pp. 792–797, 2021.
- [31] N. D. Kouvakas, F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and K. Markou, "A Modular Supervisory Control Scheme for the Safety of an Automated Manufacturing System," *2022 2nd International Conference on Robotics, Automation and Artificial Intelligence (RAAI)*, Singapore, Singapore, pp. 105-112, 2022.
- [32] N. D. Kouvakas, F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, A. Souliotis, "Modular Supervisory Control for the Coordination of a Manufacturing Cell with Observable Faults," *Sensors*, vol. 23(1), p. 163, 2023.
- [33] F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, and A. A. Michos, "Modular supervisory control for multi-floor manufacturing processes," *Control Theory Technol.*, vol. 21, pp. 148–160, 2023.
- [34] F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, and N. Ch. Kyriazis. "A two layer supervisor scheme for ring manufacturing production chains," *SouthEast European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM '16)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 48–52, 2016.
- [35] R. Su, J. H. Van Schuppen and J. E. Rooda, "Maximally permissive coordinated distributed supervisory control of nondeterministic discrete-event systems", *Automatica*, vol. 48(7), pp. 1237-1247, 2012.
- [36] A. N. Menexis, F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, and N. D. Kouvakas, "Toward Design and Implementation of Intelligent Manufacturing in Semiconductor Production Industry with Wafer Chamber Faults," *Frontiers of Artificial Intelligence, Ethics, and Multidisciplinary Applications. (FAIEMA 2023)*. Springer, Singapore, 2023.
- [37] F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and D. Mparkas, "Modelling and Control of a Parametric Wafer Manufacturing Process," *2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, São Bernardo do Campo, Brazil, pp. 724-730, 2023.
- [38] F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and B. Siake, "Safe operation of a modular production system via supervisor automata," *2023 31st Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Limassol, Cyprus, pp. 938-945, 2023.
- [39] F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and V. C. Michalainas, "Modular supervisory control for mining process elevator systems," *2017 6th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*, Thessaloniki, Greece, pp. 1-4, 2017.
- [40] F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, M. P. Tzamtzi, G. E. Panagiotakis, and A. Markoutis, "Modeling and Supervisor Design for a Baggage Handling System," *Frontiers of Artificial Intelligence, Ethics, and Multidisciplinary Applications. (FAIEMA 2023)*, Springer, Singapore, 2023.
- [41] N. Beatriz Portilla, M. H. de Queiroz and J. E. Cury, "Integration of supervisory control with SCADA system for a flexible manufacturing cell," *2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Porto Alegre, Brazil, pp. 261-266, 2014.
- [42] Programmable controllers IEC 61131- Part 3: Programming languages, International Electrotechnical Commission, 2013.
- [43] A. Ioana, and A. Korodi, "DDS and OPC UA Protocol Coexistence Solution in Real-Time and Industry 4.0 Context Using Non-Ideal Infrastructure," *Sensors*, vol. 21, p. 7760, 2021.
- [44] E. Kučera, O. Haffner, P. Drahoš, and J. Cigánek, "Educational Case Studies for Pilot Engineer 4.0 Programme: Monitoring and Control of Discrete-Event Systems Using OPC UA and Cloud Applications," *Appl. Sci.*, vol. 12, p. 8802, 2022.

- [45] A. N. Menexis, D. G. Fragkoulis, F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "A FIWARE based Input-Output Supervisor Control Implementation," 2024 IEEE 29th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Padova, Italy, 2024, pp. 01-04.
- [46] F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and S. Arapakis, "Supervisor design for an assembly line in the presence of faults," 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Stuttgart, Germany, pp. 1-8, 2022.
- [47] F. N. Koumboulis and D. G. Fragkoulis, "Input-Output Supervisor Design for Systems Analyzed in Cooperating Pairs of Subsystems," 2024 32nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Chania - Crete, Greece, pp. 43-49, 2024.
- [48] Leitão, H.A.S.; Rosso, R.S.U.; Leal, A.B.; Zoitl, A. Fault Handling in Discrete Event Systems Applied to IEC 61499. In Proceedings of the 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vienna, Austria, 8–11 September 2020.
- [49] D. G. Fragkoulis, F. N. Koumboulis, N. D. Kouvakas and A. N. Menexis, "Supervisors for Gas Compressor Stations with Compression and Valve Faults," 2023 8th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM), Piraeus, Greece, pp. 1-6, 2023.
- [50] F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, I. Kalkanas, and G. F. Fragulis, "Supervisor design for a pressurized reactor unit in the presence of sensor and actuator faults," *Electronics*, vol. 11(16), 2534, 2022.
- [51] J. Sigalas, F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, and N. D. Kouvakas, "Fault Tolerance of a Circular Manufacturing System in the Framework of Supervisory Control Theory," *Frontiers of Artificial Intelligence, Ethics, and Multidisciplinary Applications. (FAIEMA 2023)*. Springer, Singapore, 2023.
- [52] K. Michail, K. M. Deliparaschos, S. G. Tzafestas, and A. C. Zolotas, "AI-Based Actuator/Sensor Fault Detection With Low Computational Cost for Industrial Applications," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24(1), pp. 293-301, 2016.
- [53] D. Zhou, Y. Zhao, Z. Wang, X. He, and M. Gao, "Review on Diagnosis Techniques for Intermittent Faults in Dynamic Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67(3), pp. 2337-2347 2020.
- [54] D. G. Patsatzis, L. Russo, I.s G. Kevrekidis, and C. Siettos, "Data-driven control of agent-based models: An Equation/Variable-free machine learning approach," *Journal of Computational Physics*, vol. 478, 111953, 2023.
- [55] F. Celi, G. Baggio and F. Pasqualetti, "Distributed Data-Driven Control of Network Systems," *IEEE Open Journal of Control Systems*, vol. 2, pp. 93-107, 2023.
- [56] M. Konishi, T. Sasaki, and K. Cai, "Efficient safe control via deep reinforcement learning and supervisory control – case study on multirobot warehouse automation," *Proc. IFAC WODES*, 2022.
- [57] Z. Li, U. Kalabić and T. Chu, "Safe Reinforcement Learning: Learning with Supervision Using a Constraint-Admissible Set," 2018 Annual American Control Conference (ACC), Milwaukee, WI, USA, 2018, pp. 6390-6395.
- [58] Q. -S. Jia, Q. Guo and Y. Wang, "On Efficient Sampling in Supervisory Reinforcement Learning," 2024 43rd Chinese Control Conference (CCC), Kunming, China, 2024, pp. 1550-1555.
- [59] M. R. Canelón and E. C. Morles, "Reinforcement Learning-Based Supervisor System Proposal for Fault-Tolerant Control of Direct Fired Heater," 2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Prague, Czech Republic, 2022, pp. 1-6.
- [60] N. Saoda, W. Wang, M. F. R. M. Billah and B. Campbell, "An Energy Supervisor Architecture for Energy-Harvesting Applications," 2022 21st ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), Milano, Italy, 2022.
- [61] K. Ogawa and K. Sawada, "Model Reconstruction via Hierarchical Supervisory Control with Cyber Attacks," 2024 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, NV, USA, 2024, pp. 1-6.
- [62] X. Chen, H. Peng, J. Wang, and F., Hao, "Supervisory control of discrete event systems under asynchronous spiking neuron P systems," *Information Sciences*, vol. 597, pp. 253-273, 2022.
- [63] A. Ouaret, H. Lehouche, B. Mendil, and H. Guéguen, "Supervisory control of building heating system with insulation changes using three architectures of neural networks," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 357(18), pp. 13362-13385, 2020.