



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής»
«Advanced Control Systems and Robotics»

«Δομοστοιχειωτός έλεγχος βιομηχανικού συστήματος
κατεργασιών σε δακτυλιοειδή διάταξη»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

που υποβλήθηκε στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο «Προηγμένα Συστήματα
Ελέγχου και Ρομποτικής» του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών ως
μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στα
Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής

από τον

Κωνσταντίνος Μάρκου

Ιούλιος 2022



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής»
«Advanced Control Systems and Robotics»

«Δομοστοιχειωτός έλεγχος βιομηχανικού συστήματος
κατεργασιών σε δακτυλιοειδή διάταξη»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

που υποβλήθηκε στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο «Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής» του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στα Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής

από τον

Κωνσταντίνος Μάρκου

Δήλωση Αυθεντικότητας, ζητήματα **Copyright**

«Ο μεταπτυχιακός φοιτητής που εκπόνησε την παρούσα διπλωματική εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στη βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (μη-εμπορικός, μη-κερδοσκοπικός, αλλά εκπαιδευτικός-ερευνητικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες κ.λπ.), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος που χρησιμοποιεί σε σχέση με το όλο κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή την γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου».

Ιούλιος 2022

«Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την τριμελή εξεταστική επιτροπή η οποία ορίστηκε από την Συνέλευση του Γενικού Τμήματος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, σύμφωνα με το νόμο και τον εγκεκριμένο Οδηγό Σπουδών του ΠΜΣ «Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής». Τα μέλη της Επιτροπής ήταν:

1. Νικόλαος Δ. Κούβακας, Αναπληρωτής Καθηγητής.....(Επιβλέπων)
2. Φώτιος Ν. Κουμπουλής, Καθηγητής(Μέλος)
3. Δημήτριος Γ. Φραγκούλης, Επίκουρος Καθηγητής.....(Μέλος)

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Γενικό Τμήμα του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα.

Σύμφωνα με τον Ν. 4589/2019 (ΦΕΚ 13/29-1-2019 τ. Α) το Π.Μ.Σ. «Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής» εντάχθηκε στο Γενικό Τμήμα του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.»

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιαστεί ένα βιομηχανικό σύστημα κατεργασίας της βιβλιογραφίας. Αρχικά θα παρουσιαστεί η μοντελοποίηση όλων των υποσυστημάτων του συστήματος με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων. Στη συνέχεια μέσω της παράλληλης σύνδεσης θα παρουσιαστεί το συνολικό μοντέλο του συστήματος. Θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του συνολικού αυτόματου. Η επιθυμητή συμπεριφορά του βιομηχανικού συστήματος τόσο από πλευράς συντονισμού των υποσυστημάτων όσο και από πλευράς προδιαγραφών ασφαλείας θα παρουσιαστεί στη μορφή κανόνων. Στη συνέχεια η επιθυμητή συμπεριφορά θα παρουσιαστεί στη μορφή κανονικών γλώσσων για τις οποίες θα αποδειχτεί η ελεγχσιμότητα σε ότι αφορά το συνολικό αυτόματο. Σύμφωνα με τις επιθυμητές κανονικές γλώσσες θα πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός μίας δομοστοιχειωτής αρχιτεκτονικής ελέγχου η οποία αποφεύγει τον εγκλωβισμό. Συνεπώς θα σχεδιαστούν επόπτες ελεγκτές οι οποίοι σημαδεύουν και παράγουν τις επιθυμητές κανονικές γλώσσες. Τέλος θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του ελεγχόμενου αυτόματου.

Λέξεις κλειδιά: Πεπερασμένα ντετερμινιστικά αυτόματα, Επόπτης ελεγκτής, Δομοστοιχειωτός εποπτικός έλεγχος, Ευέλικτα Συστήματα Παραγωγής

Abstract

In this diploma thesis, an industrial manufacturing system of the bibliography will be presented. Initially, the modeling of all subsystems of the system using finite deterministic automata will be presented. Then through the parallel composition the overall model of the system will be presented. The total automaton will be simulated. The desired behavior of the industrial system regarding the subsystem's coordination and the safety specifications will be presented in the form of rules. Then the desired behavior will be presented in the form of regular languages where the controllability of the desired languages regarding the total automaton will be proved. According to the desired regular languages, the design of a modular nonblocking control architecture will be designed. Therefore, supervisors will be designed which mark and produce the desired regular languages. Finally, the controlled automaton will be simulated.

Keywords: Finite Deterministic Automata, Supervisory control, Modular supervisory control, Flexible Manufacturing System, Ring Production Process

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	3
2.1 ΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ...	3
2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	4
2.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ	5
2.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΙΜΑΝΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	9
2.5 ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	11
2.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ.....	14
3.1 ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	14
3.2 ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΕΠΟΠΤΕΣ ΤΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ.....	17
4.1 ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟ	17
4.2 ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	19
4.3 ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	21
4.4 ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΡΙΤΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΤΟΣ ΕΠΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΥ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ	24
5.1 ΤΟ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟ ΑΥΤΟΜΑΤΟ	24
5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΥ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	26
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	27

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του σταθμού κατεργασίας i	5
Σχήμα 2: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 1	6
Σχήμα 3: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 2	8
Σχήμα 4: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 3	9
Σχήμα 5: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ιμάντα μεταφοράς.....	11
Σχήμα 6: Το αυτόματο του επόπτη 1S	19
Σχήμα 7: Το αυτόματο του επόπτη $^{2,1}S$	20
Σχήμα 8: Το αυτόματο του επόπτη $^{2,2}S$	22
Σχήμα 9: Το αυτόματο του επόπτη 3S	23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιαστεί ένα βιομηχανικό σύστημα κατεργασίας της βιβλιογραφίας. Αρχικά θα παρουσιαστεί η μοντελοποίηση όλων των υποσυστημάτων του συστήματος με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων. Στη συνέχεια μέσω της παράλληλης σύνδεσης θα παρουσιαστεί το συνολικό μοντέλο του συστήματος. Θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του συνολικού αυτόματου. Η επιθυμητή συμπεριφορά του βιομηχανικού συστήματος τόσο από πλευράς συντονισμού των υποσυστημάτων όσο και από πλευράς προδιαγραφών ασφαλείας θα παρουσιαστεί στη μορφή κανόνων. Στη συνέχεια η επιθυμητή συμπεριφορά θα παρουσιαστεί στη μορφή κανονικών γλωσσών για τις οποίες θα αποδειχτεί η ελεγκσιμότητας σε ότι αφορά το συνολικό αυτόματο. Σύμφωνα με τις επιθυμητές κανονικές γλώσσες θα πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός μίας δομοστοιχειωτής αρχιτεκτονικής ελέγχου η οποία αποφεύγει τον εγκλωβισμό. Συνεπώς θα σχεδιαστούν επόπτες ελεγκτές οι οποίοι σημαδεύουν και παράγουν τις επιθυμητές κανονικές γλώσσες. Τέλος θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του ελεγχόμενου αυτόματου.

Η αναλυτική περιγραφή της δομής της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Στο Κεφάλαιο 2 θα παρουσιαστεί το μαθηματικό μοντέλο της μονάδας καθώς και των υποσυστημάτων της με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων. Έπειτα θα προσομοιωθεί το σύστημα για δεδομένη ακολουθία συμβάντων.

Στο Κεφάλαιο 3 θα περιγραφεί η επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος σε μορφή κανόνων. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η επιθυμητή συμπεριφορά στη μορφή κανονικών γλωσσών. Θα αποδειχθεί η ελεγκσιμότητα των επιθυμητών γλωσσών ως προς το συνολικό σύστημα καθώς και η ιδιότητα των μη αντικρουόμενων γλωσσών.

Στο Κεφάλαιο 4 θα παρουσιαστεί η υλοποίηση των εποπτών που υλοποιούν τις επιθυμητές γλώσσες. Θα προσομοιωθεί το ελεγχόμενο σύστημα για την δεδομένη ακολουθία συμβάντων.

Στο Κεφάλαιο 5 θα παρουσιαστεί η δομοστοιχειωτή αρχιτεκτονική εποπτικού ελέγχου που θα εφαρμοστεί στο σύστημα η οποία αποφεύγει τον εγκλωβισμό. Έπειτα θα προσομοιωθεί το ελεγχόμενο σύστημα για δεδομένη ακολουθία συμβάντων.

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής.

-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

2.1 ΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τα αυτοματοποιημένα βιομηχανικά συστήματα κατεργασίας είναι δυναμικά συστήματα όπου συμβάντα συμβαίνουν με ασύγχρονο τρόπο όπως η έναρξη και το τέλος μιας λειτουργίας ή η άφιξη ή η αναχώρηση προϊόντων κ.α.. Συνήθως, ένα βιομηχανικό σύστημα κατεργασίας αποτελείται από συσκευές αριθμητικού ελέγχου οι οποίες συνδέονται με συσκευές μεταφοράς προϊόντων, όπως ρομπότ και αυτοματοποιημένα κατευθυνόμενα οχήματα. Οι συσκευές των βιομηχανικών συστημάτων κατεργασίας αλληλεπιδρούν μεταξύ τους για την παραγωγή προϊόντων ακολουθώντας μια προκαθορισμένη σειρά λειτουργιών. ([1], [2])

Ένα αυτοματοποιημένο βιομηχανικό σύστημα κατεργασίας είναι ένα σύστημα ικανό να κατεργάζεται ταυτόχρονα ένα μεγάλο αριθμό προϊόντων [1]. Ένα βιομηχανικό σύστημα κατεργασίας αποτελείται από σταθμούς κατεργασίας, ένα αυτοματοποιημένο σύστημα μεταφοράς υλικών που διασυνδέει ολόκληρο το σύστημα και ένα υπολογιστικό σύστημα που ενσωματώνει όλες τις εργασίες παραγωγής και συντονισμού. Στα αυτοματοποιημένα βιομηχανικά συστήματα κατεργασίας απαιτούνται πόροι για την εκτέλεση των λειτουργιών, όπως μηχανές αριθμητικού ελέγχου και συσκευές μεταφοράς υλικών, όπως ρομπότ για τη φόρτωση ή την εκφόρτωση των μηχανών. Οι χώροι αποθήκευσης είναι επίσης κοινά στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος (buffers). Γενικά, ο αριθμός των πόρων είναι περιορισμένος και πρέπει να μοιράζονται για να πραγματοποιηθούν οι λειτουργίες. Η κοινή χρήση πόρων μπορεί να προκαλέσει γνωστά προβλήματα όπως συγκρούσεις και αδιέξοδα και να μειώσει την απόδοση του συστήματος. [1]

Το αυτοματοποιημένο βιομηχανικό σύστημα κατεργασίας που θα διερευνηθεί αποτελείται από τρεις σταθμούς κατεργασίας, τρία ρομποτικά συστήματα μεταφοράς

προϊόντων, δυο προσωρινές θέσεις αποθήκευσης και έναν κυκλικό μάντα μεταφοράς προϊόντων.

2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το μαθηματικό μοντέλο του i σταθμού κατεργασίας όπου $i \in \{1, 2, 3\}$ σύμφωνα με την [5] με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων ([4]-[9]) είναι

$${}^i\mathbf{G}_M = ({}^i\mathbb{Q}_M, {}^i\mathbb{E}_M, {}^i f_M, {}^i\mathbb{H}_M, {}^i x_{M,0}, {}^i\mathbb{Q}_{M,m})$$

όπου $i \in \{1, 2, 3\}$.

Το σύνολο των καταστάσεων του συστήματος είναι

$${}^i\mathbb{Q}_M = \{{}^i q_{M,1}, {}^i q_{M,2}\}$$

Η κατάσταση ${}^i q_{M,1}$ συμβολίζει την περίπτωση όπου ο i σταθμός κατεργασίας είναι ανενεργός.

Η κατάσταση ${}^i q_{M,2}$ συμβολίζει την περίπτωση όπου ο σταθμός i είναι σε κατάσταση κατεργασίας (ενεργός).

Το αλφάβητο του αυτόματου είναι

$${}^i\mathbb{E}_M = \{{}^i e_{M,1}, {}^i e_{M,2}\}$$

Το συμβάν ${}^i e_{M,1}$ είναι η εντολή στον σταθμό κατεργασίας i να εκκινήσει την κατεργασία. Το συμβάν ${}^i e_{M,2}$ λαμβάνει χώρα όταν ολοκληρωθεί η κατεργασία από τον σταθμό κατεργασίας i .

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι ${}^i x_{M,0} = {}^i q_{M,1}$.

Η σημαδεμένη κατάσταση του αυτόματου του σταθμού κατεργασίας είναι η ${}^i q_{M,1}$ επομένως ισχύει ότι ${}^i\mathbb{Q}_{M,m} = \{{}^i q_{M,1}\}$.

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$${}^i f_M({}^i q_{M,1}, {}^i e_{M,1}) = {}^i q_{M,2} \text{ και } {}^i f_M({}^i q_{M,2}, {}^i e_{M,2}) = {}^i q_{M,1}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

$${}^i\mathbb{H}_M({}^i q_{M,1}) = \{{}^i e_{M,1}\} \text{ και } {}^i\mathbb{H}_M({}^i q_{M,2}) = \{{}^i e_{M,2}\}$$

Τα ελέγξιμα συμβάντα του συστήματος είναι ${}^i\mathbb{E}_{M,c} = \{{}^i e_{M,1}\}$ και τα μη ελέγξιμα συμβάντα είναι ${}^i\mathbb{E}_{M,uc} = \{{}^i e_{M,2}\}$

Η γλώσσα που παράγει το αυτόματο είναι

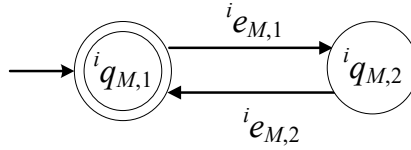
$$\mathbb{L}({}^i\mathbf{G}_M) = \overline{({}^i e_{M,1} {}^i e_{M,2})^*}$$

Η γλώσσα που σημαδεύει το αυτόματο είναι

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

Το παραπάνω είναι ένα σύστημα που αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς $\overline{\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_M)} = \mathbb{L}(\mathbf{G}_M)$.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το διάγραμμα κατάστασης του σταθμού κατεργασίας i .



Σχήμα 1: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του σταθμού κατεργασίας i

2.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ

Το μαθηματικό μοντέλο του ρομποτικού βραχίονα 1 [3] με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων ([4]-[9]) είναι

$${}^1\mathbf{G}_R = ({}^1\mathbb{Q}_R, {}^1\mathbb{E}_R, {}^1f_R, {}^1\mathbb{H}_R, {}^1x_{R,0}, {}^1\mathbb{Q}_{R,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του συστήματος είναι

$${}^1\mathbb{Q}_R = \{{}^1q_{R,1}, {}^1q_{R,2}\}$$

Η κατάσταση ${}^1q_{R,1}$ συμβολίζει την περίπτωση όπου ο ρομποτικός βραχίονας 1 είναι άδειος δηλαδή δεν κρατάει κάποιο προϊόν στην αρπάγη του. Η κατάσταση ${}^1q_{R,2}$ συμβολίζει την περίπτωση όπου ο ρομποτικός βραχίονας 1 είναι γεμάτος δηλαδή κρατάει κάποιο προϊόν στην αρπάγη του.

Το αλφάβητο του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 1 είναι

$${}^1\mathbb{E}_R = \{{}^1e_{R,1}, {}^1e_{R,2}, {}^1e_{R,3}, {}^1e_{R,4}\}$$

Το συμβάν ${}^1e_{R,1}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 1 να πάρει ένα ακατέργαστο προϊόν από την παλέτα με τα ακατέργαστα προϊόντα. Το συμβάν ${}^1e_{R,2}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 1 να πάρει ένα προϊόν από τον μάντα μεταφοράς. Το συμβάν ${}^1e_{R,3}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 1 να αφήσει ένα προϊόν στον μάντα μεταφοράς. Το συμβάν ${}^1e_{R,4}$

είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 1 να αφήσει ένα κατεργασμένο προϊόν στην παλέτα με των τελικών προϊόντων.

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι ${}^1x_{R,0} = {}^1q_{R,1}$.

Η μοναδική σημαδεμένη κατάσταση του αυτόματου είναι η ${}^1q_{R,1}$ επομένως ισχύει ότι ${}^1Q_{R,m} = \{{}^1q_{R,1}\}$.

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$${}^1f_R({}^1q_{R,1}, e) = {}^1q_{R,2}; \forall e \in \{{}^1e_{R,1}, {}^1e_{R,2}\} \text{ και } {}^1f_R({}^1q_{R,2}, e) = {}^1q_{R,1}; \forall e \in \{{}^1e_{R,3}, {}^1e_{R,4}\}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

$${}^1\mathbb{H}_R({}^1q_{R,1}) = \{{}^1e_{R,1}, {}^1e_{R,2}\} \text{ και } {}^1\mathbb{H}_R({}^1q_{R,2}) = \{{}^1e_{R,3}, {}^1e_{R,4}\}$$

Τα ελέγξιμα συμβάντα του συστήματος είναι ${}^1\mathbb{E}_{R,c} = \{{}^1e_{R,1}, {}^1e_{R,2}, {}^1e_{R,3}, {}^1e_{R,4}\}$ και τα μη ελέγξιμα συμβάντα είναι ${}^1\mathbb{E}_{R,nc} = \emptyset$.

Η γλώσσα που παράγει το αυτόματο είναι

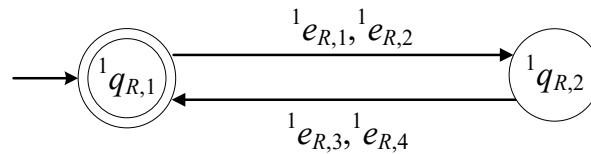
$$\mathbb{L}({}^1\mathbf{G}_R) = \overline{({}^1e_{R,1} + {}^1e_{R,2})({}^1e_{R,3} + {}^1e_{R,4})}^*$$

Η γλώσσα που σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}_m({}^1\mathbf{G}_R) = \overline{({}^1e_{R,1} + {}^1e_{R,2})({}^1e_{R,3} + {}^1e_{R,4})}^*$$

Το παραπάνω είναι ένα σύστημα που αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς $\overline{\mathbb{L}_m({}^1\mathbf{G}_R)} = \mathbb{L}({}^1\mathbf{G}_R)$.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 1.



Σχήμα 2: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 1

Το μαθηματικό μοντέλο του ρομποτικού βραχίονα 2 με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων ([4]-[9]) είναι

$${}^2\mathbf{G}_R = ({}^2Q_R, {}^2\mathbb{E}_R, {}^2f_R, {}^2\mathbb{H}_R, {}^2x_{R,0}, {}^2Q_{R,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του συστήματος είναι

$${}^2\mathbb{Q}_R = \{{}^2q_{R,1}, {}^2q_{R,2}\}$$

Η κατάσταση ${}^2q_{R,1}$ συμβολίζει την περίπτωση όπου ο ρομποτικός βραχίονας 2 είναι άδειος δηλαδή δεν κρατάει κάποιο προϊόν στην αρπάγη του. Η κατάσταση ${}^2q_{R,2}$ συμβολίζει την περίπτωση όπου ο ρομποτικός βραχίονας 2 είναι γεμάτος δηλαδή κρατάει κάποιο προϊόν στην αρπάγη του.

Το αλφάβητο του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 2 είναι

$${}^2\mathbb{E}_R = \{{}^2e_{R,1}, {}^2e_{R,2}, {}^2e_{R,3}, {}^2e_{R,4}, {}^2e_{R,5}, {}^2e_{R,6}, {}^2e_{R,7}, {}^2e_{R,8}\}$$

Το συμβάν ${}^2e_{R,1}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 2 να πάρει ένα προϊόν από τον ιμάντα. Το συμβάν ${}^2e_{R,2}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 2 να πάρει ένα προϊόν από την προσωρινή μνήμη αποθήκευσης 1. Το συμβάν ${}^2e_{R,3}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 2 να πάρει ένα προϊόν από τον σταθμό κατεργασίας 1. Το συμβάν ${}^2e_{R,4}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 2 να πάρει ένα προϊόν από τον σταθμό κατεργασίας 2. Το συμβάν ${}^2e_{R,5}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 2 να αφήσει ένα προϊόν στον ιμάντα. Το συμβάν ${}^2e_{R,6}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 2 να αφήσει ένα προϊόν στην προσωρινή μνήμη αποθήκευσης 1. Το συμβάν ${}^2e_{R,7}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 2 να αφήσει ένα προϊόν στον σταθμό κατεργασίας 1. Το συμβάν ${}^2e_{R,8}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 2 να αφήσει ένα προϊόν στον σταθμό κατεργασίας 2.

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι ${}^2x_{R,0} = {}^2q_{R,1}$.

Η μοναδική σημαδεμένη κατάσταση του αυτόματου είναι η ${}^2q_{R,1}$ επομένως ισχύει ότι ${}^2\mathbb{Q}_{R,m} = \{{}^2q_{R,1}\}$.

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$\begin{aligned} {}^2f_R({}^2q_{R,1}, e) &= {}^2q_{R,2}; \forall e \in \{{}^2e_{R,1}, {}^2e_{R,2}, {}^2e_{R,3}, {}^2e_{R,4}\} \text{ και} \\ {}^2f_R({}^2q_{R,2}, e) &= {}^2q_{R,1}; \forall e \in \{{}^2e_{R,5}, {}^2e_{R,6}, {}^2e_{R,7}, {}^2e_{R,8}\} \end{aligned}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

$${}^2\mathbb{H}_R({}^2q_{R,1}) = \{{}^2e_{R,1}, {}^2e_{R,2}, {}^2e_{R,3}, {}^2e_{R,4}\} \text{ και } {}^2\mathbb{H}_R({}^2q_{R,2}) = \{{}^2e_{R,5}, {}^2e_{R,6}, {}^2e_{R,7}, {}^2e_{R,8}\}$$

Τα ελέγξιμα συμβάντα του συστήματος είναι ${}^1\mathbb{E}_{R,c} = \{{}^2e_{R,1}, {}^2e_{R,2}, {}^2e_{R,3}, {}^2e_{R,4}\}$ και τα μη ελέγξιμα συμβάντα είναι ${}^2\mathbb{E}_{R,uc} = \emptyset$.

Η γλώσσα που παράγει το αυτόματο είναι

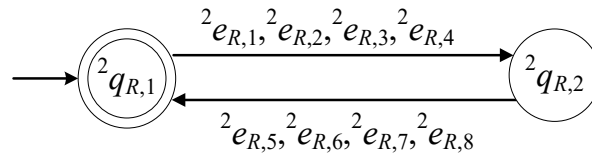
$$\mathbb{L}({}^2\mathbf{G}_R) = \overline{\left(({}^2e_{R,1} + {}^2e_{R,2} + {}^2e_{R,3} + {}^2e_{R,4})({}^2e_{R,5} + {}^2e_{R,6} + {}^2e_{R,7} + {}^2e_{R,8}) \right)^*}$$

Η γλώσσα που σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}_m({}^2\mathbf{G}_R) = \left(({}^2e_{R,1} + {}^2e_{R,2} + {}^2e_{R,3} + {}^2e_{R,4})({}^2e_{R,5} + {}^2e_{R,6} + {}^2e_{R,7} + {}^2e_{R,8}) \right)^*$$

Το παραπάνω είναι ένα σύστημα που αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς $\overline{\mathbb{L}_m({}^2\mathbf{G}_R)} = \mathbb{L}({}^2\mathbf{G}_R)$.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 2.



Σχήμα 3: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 2

Το μαθηματικό μοντέλο του ρομποτικού βραχίονα 3 με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων ([4]-[9]) είναι

$${}^3\mathbf{G}_R = ({}^3\mathbb{Q}_R, {}^3\mathbb{E}_R, {}^3f_R, {}^3\mathbb{H}_R, {}^3x_{R,0}, {}^3\mathbb{Q}_{R,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του συστήματος είναι

$${}^3\mathbb{Q}_R = \{ {}^3q_{R,1}, {}^3q_{R,2} \}$$

Η κατάσταση ${}^3q_{R,1}$ συμβολίζει την περίπτωση όπου ο ρομποτικός βραχίονας 3 είναι άδειος δηλαδή δεν κρατάει κάποιο προϊόν στην αρπάγη του. Η κατάσταση ${}^3q_{R,2}$ συμβολίζει την περίπτωση όπου ο ρομποτικός βραχίονας 3 είναι γεμάτος δηλαδή κρατάει κάποιο προϊόν στην αρπάγη του.

Το αλφάβητο του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 3 είναι

$${}^3\mathbb{E}_R = \{ {}^3e_{R,1}, {}^3e_{R,2}, {}^3e_{R,3}, {}^3e_{R,4}, {}^3e_{R,5}, {}^3e_{R,6} \}$$

Το συμβάν ${}^3e_{R,1}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 3 να πάρει ένα προϊόν από τον μάντα μεταφοράς. Το συμβάν ${}^3e_{R,2}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 3 να πάρει ένα προϊόν από την προσωρινή μνήμη αποθήκευσης. Το συμβάν ${}^3e_{R,3}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 3 να πάρει ένα προϊόν από τον σταθμό κατεργασίας 3. Το συμβάν ${}^3e_{R,4}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 3 να αφήσει ένα προϊόν στον μάντα μεταφοράς. Το συμβάν ${}^3e_{R,5}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 3 να αφήσει ένα προϊόν στην προσωρινή μνήμη

αποθήκευσης. Το συμβάν ${}^3e_{R,6}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα 3 να αφήσει ένα προϊόν στον σταθμό κατεργασίας 3.

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι ${}^3x_{R,0} = {}^3q_{R,1}$.

Η μοναδική σημαδεμένη κατάσταση του αυτόματου είναι η ${}^3q_{R,1}$ επομένως ισχύει ότι ${}^3\mathbb{Q}_{R,m} = \{{}^3q_{R,1}\}$.

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$${}^3f_R({}^3q_{R,1}, e) = {}^3q_{R,2}; \forall e \in \{{}^3e_{R,1}, {}^3e_{R,2}, {}^3e_{R,3}\} \text{ και } {}^3f_R({}^3q_{R,2}, e) = {}^3q_{R,1}; \forall e \in \{{}^3e_{R,4}, {}^3e_{R,5}, {}^3e_{R,6}\}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

$${}^3\mathbb{H}_R({}^3q_{R,1}) = \{{}^3e_{R,1}, {}^3e_{R,2}, {}^3e_{R,3}\} \text{ και } {}^3\mathbb{H}_R({}^3q_{R,2}) = \{{}^3e_{R,4}, {}^3e_{R,5}, {}^3e_{R,6}\}$$

Τα ελέγξιμα συμβάντα του συστήματος είναι ${}^3\mathbb{E}_{R,c} = \{{}^3e_{R,1}, {}^3e_{R,2}, {}^3e_{R,3}, {}^3e_{R,4}, {}^3e_{R,5}, {}^3e_{R,6}\}$ και τα μη ελέγξιμα συμβάντα είναι ${}^3\mathbb{E}_{R,uc} = \emptyset$.

Η γλώσσα που παράγει το αυτόματο είναι

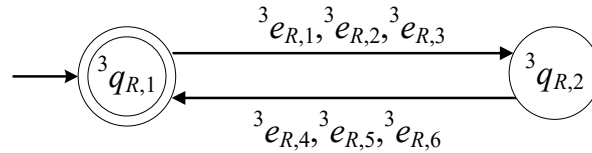
$$\mathbb{L}({}^3\mathbf{G}_R) = \overline{({}^3e_{R,1} + {}^3e_{R,2} + {}^3e_{R,3})({}^3e_{R,4} + {}^3e_{R,5} + {}^3e_{R,6})}^*$$

Η γλώσσα που σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}_m({}^3\mathbf{G}_R) = \overline{({}^3e_{R,1} + {}^3e_{R,2} + {}^3e_{R,3})({}^3e_{R,4} + {}^3e_{R,5} + {}^3e_{R,6})}^*$$

Το παραπάνω είναι ένα σύστημα που αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς $\overline{\mathbb{L}_m({}^3\mathbf{G}_R)} = \mathbb{L}({}^3\mathbf{G}_R)$.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 3.



Σχήμα 4: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 3

2.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΙΜΑΝΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Το μαθηματικό μοντέλο του ιμάντα μεταφοράς [3] με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων ([4]-[9]) είναι

$$\mathbf{G}_C = (\mathbb{Q}_C, \mathbb{E}_C, f_C, \mathbb{H}_C, x_{C,0}, \mathbb{Q}_{C,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του συστήματος είναι

$$\mathbb{Q}_C = \{q_{C,1}, q_{C,2}\}$$

Η κατάσταση $q_{C,1}$ συμβολίζει την περίπτωση όπου ο μάντας μεταφοράς είναι ακίνητος. Η κατάσταση $q_{C,2}$ συμβολίζει την περίπτωση όπου ο μάντας μεταφοράς κινείται.

Το αλφάβητο του αυτόματου του μάντα μεταφοράς είναι

$$\mathbb{E}_C = \{e_{C,1}, e_{C,2}\}$$

Το συμβάν $e_{C,1}$ είναι η εντολή στον μάντα μεταφοράς να κινηθεί κατά μία θέση. Το συμβάν $e_{C,2}$ είναι το σήμα που παράγεται ότι ο μάντας σταμάτησε να κινείται.

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι $x_{C,0} = q_{C,1}$.

Η μοναδική σημαδεμένη κατάσταση του αυτόματου είναι η $q_{C,1}$ επομένως ισχύει ότι $\mathbb{Q}_{C,m} = \{q_{C,1}\}$.

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$f_C(q_{C,1}, e_{C,1}) = q_{C,2} \text{ και } f_C(q_{C,2}, e_{C,2}) = q_{C,1}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

$$\mathbb{H}_C(q_{C,1}) = \{e_{C,1}\} \text{ και } \mathbb{H}_C(q_{C,2}) = \{e_{C,2}\}$$

Τα ελέγξιμα συμβάντα του συστήματος είναι $\mathbb{E}_{C,e} = \{e_{C,1}\}$ και τα μη ελέγξιμα συμβάντα είναι $\mathbb{E}_{C,uc} = \{e_{C,2}\}$.

Η γλώσσα που παράγει το αυτόματο είναι

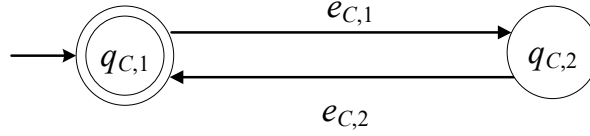
$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_C) = \overline{(e_{C,1}e_{C,2})^*}$$

Η γλώσσα που σημαδεύει το αυτόματο είναι

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

Το παραπάνω είναι ένα σύστημα που αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς $\overline{\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_C)} = \mathbb{L}(\mathbf{G}_C)$.

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του μάντα μεταφοράς.



Σχήμα 5: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του μάντα μεταφοράς

2.5 ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η υλοποίηση του συνολικού συστήματος με χρήση των πολυμελών πράξεων των πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων και πιο συγκεκριμένα της παράλληλης σύνδεσης ([4]-[5]) είναι η ακόλουθη.

$$\mathbf{G} = {}^1\mathbf{G}_M \parallel {}^2\mathbf{G}_M \parallel {}^3\mathbf{G}_M \parallel {}^1\mathbf{G}_R \parallel {}^2\mathbf{G}_R \parallel {}^3\mathbf{G}_R \parallel \mathbf{G}_C$$

Οι καταστάσεις θα είναι

$$\mathbf{Q} = {}^1\mathbf{Q}_M \times {}^2\mathbf{Q}_M \times {}^3\mathbf{Q}_M \times {}^1\mathbf{Q}_R \times {}^2\mathbf{Q}_R \times {}^3\mathbf{Q}_R \times \mathbf{Q}_C$$

όπου

$$\mathbf{Q} = \bigcup_{i=1}^2 \left(\bigcup_{j=1}^2 \left(\bigcup_{k=1}^2 \left(\bigcup_{o=1}^2 \left(\bigcup_{p=1}^2 \left(\bigcup_{r=1}^2 \left(\bigcup_{t=1}^2 \{({}^1q_{M,i}, {}^2q_{M,j}, {}^3q_{M,k}, {}^1q_{R,o}, {}^2q_{R,p}, {}^3q_{R,r}, q_{C,t})\} \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right)$$

Ο συνολικός αριθμός των καταστάσεων είναι $2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 128$ καταστάσεις (προσβάσιμες και μη προσβάσιμες).

Το συνολικό αλφάβητο του συστήματος είναι

$$\mathbf{E} = {}^1\mathbf{E}_M \cup {}^2\mathbf{E}_M \cup {}^3\mathbf{E}_M \cup {}^1\mathbf{E}_R \cup {}^2\mathbf{E}_R \cup {}^3\mathbf{E}_R \cup \mathbf{E}_C$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι $x_0 = ({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$.

Η σημαδεμένη κατάσταση του αυτόματου είναι η $({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$ συνεπώς

$$\mathbf{Q}_m = \{({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})\}.$$

Οι μεταβάσεις θα είναι της μορφής

$$f(({}^1q_{M,i}, {}^2q_{M,j}, {}^3q_{M,k}, {}^1q_{R,o}, {}^2q_{R,p}, {}^3q_{R,r}, q_{C,t}), e) =$$

$$= \begin{cases} ({}^1f_M({}^1q_{M,i}, e), {}^2q_{M,j}, {}^3q_{M,k}, {}^1q_{R,o}, {}^2q_{R,p}, {}^3q_{R,r}, q_{C,t}) & \text{if } (e \in {}^1\mathbb{H}_M({}^1q_{M,i})) \\ ({}^1q_{M,i}, {}^2f_M({}^2q_{M,j}, e), {}^3q_{M,k}, {}^1q_{R,o}, {}^2q_{R,p}, {}^3q_{R,r}, q_{C,t}) & \text{if } (e \in {}^2\mathbb{H}_M({}^2q_{M,j})) \\ ({}^1q_{M,i}, {}^2q_{M,j}, {}^3f_M({}^3q_{M,k}, e), {}^1q_{R,o}, {}^2q_{R,p}, {}^3q_{R,r}, q_{C,t}) & \text{if } (e \in {}^3\mathbb{H}_M({}^3q_{M,k})) \\ ({}^1q_{M,i}, {}^2q_{M,j}, q_{M,k}, {}^1f_R({}^1q_{R,o}, e), {}^2q_{R,p}, {}^3q_{R,r}, q_{C,t}) & \text{if } (e \in {}^1\mathbb{H}_R({}^1q_{R,o})) \\ ({}^1q_{M,i}, {}^2q_{M,j}, q_{M,k}, {}^1q_{R,o}, {}^2f_R({}^2q_{R,p}, e), {}^3q_{R,r}, q_{C,t}) & \text{if } (e \in {}^2\mathbb{H}_R({}^2q_{R,p})) \\ ({}^1q_{M,i}, {}^2q_{M,j}, q_{M,k}, {}^1q_{R,o}, {}^2q_{R,p}, {}^3f_R({}^3q_{R,r}, e), q_{C,t}) & \text{if } (e \in {}^3\mathbb{H}_R({}^3q_{R,r})) \\ ({}^1q_{M,i}, {}^2q_{M,j}, q_{M,k}, {}^1q_{R,o}, {}^2q_{R,p}, {}^3q_{R,r}, f_C(q_{C,t}, e)) & \text{if } (e \in \mathbb{H}_C(q_{C,t})) \end{cases}$$

και

$$\mathbb{H}(({}^1q_{M,i}, {}^2q_{M,j}, {}^3q_{M,k}, {}^1q_{R,o}, {}^2q_{R,p}, {}^3q_{R,r}, q_{C,t})) =$$

$$= {}^1\mathbb{H}_M({}^1q_{M,i}) \cup {}^2\mathbb{H}_M({}^2q_{M,j}) \cup {}^3\mathbb{H}_M({}^3q_{M,k}) \cup {}^1\mathbb{H}_R({}^1q_{R,o}) \cup {}^2\mathbb{H}_R({}^2q_{R,p}) \cup {}^3\mathbb{H}_R({}^3q_{R,r}) \cup \mathbb{H}_C(q_{C,t})$$

Η γλώσσα που παράγει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}) =$$

$$= {}^1P_M^{-1}(\mathbb{L}({}^1\mathbf{G}_M)) \cap {}^2P_M^{-1}(\mathbb{L}({}^2\mathbf{G}_M)) \cap {}^3P_M^{-1}(\mathbb{L}({}^3\mathbf{G}_M)) \cap {}^1P_R^{-1}(\mathbb{L}({}^1\mathbf{G}_R))$$

$$\cap {}^2P_R^{-1}(\mathbb{L}({}^2\mathbf{G}_R)) \cap {}^3P_R^{-1}(\mathbb{L}({}^3\mathbf{G}_R)) \cap P_C^{-1}(\mathbb{L}(\mathbf{G}_C))$$

Η γλώσσα που σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}) =$$

$$= {}^1P_M^{-1}(\mathbb{L}_m({}^1\mathbf{G}_M)) \cap {}^2P_M^{-1}(\mathbb{L}_m({}^2\mathbf{G}_M)) \cap {}^3P_M^{-1}(\mathbb{L}_m({}^3\mathbf{G}_M)) \cap {}^1P_R^{-1}(\mathbb{L}_m({}^1\mathbf{G}_R))$$

$$\cap {}^2P_R^{-1}(\mathbb{L}_m({}^2\mathbf{G}_R)) \cap {}^3P_R^{-1}(\mathbb{L}_m({}^3\mathbf{G}_R)) \cap P_C^{-1}(\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_C))$$

όπου iP_M είναι η προβολή από το αλφάβητο \mathbb{E} στο αλφάβητο ${}^i\mathbb{E}_M$, iP_R είναι η προβολή από το αλφάβητο \mathbb{E} στο αλφάβητο ${}^i\mathbb{E}_R$ και P_C είναι η προβολή από το αλφάβητο \mathbb{E} στο αλφάβητο \mathbb{E}_C .

2.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Έστω ότι στο σύστημα εφαρμόζεται η αλληλουχία συμβάντων ${}^1e_{R,1}e_{C,1}e_{C,2}{}^1e_{R,3}{}^1e_{M,1}{}^1e_{M,2}{}^2e_{M,1}{}^3e_{M,1}{}^2e_{R,1}{}^2e_{R,6}{}^3e_{M,2}{}^2e_{M,2}{}^3e_{R,1}{}^3e_{R,6} \mathbf{G}$.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η προσομοίωση του συστήματος.

Πίνακας 1: Προσομοίωση της μονάδας κατεργασίας

Συμβάντα αλληλουχίας	Καταστάσεις
	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^1e_{R,1}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,2}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
$e_{C,1}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,2}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,2})$
$e_{C,2}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,2}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^1e_{R,3}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^1e_{M,1}$	$({}^1q_{M,2}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^1e_{M,2}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^2e_{M,1}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,2}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^3e_{M,1}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,2}, {}^3q_{M,2}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^2e_{R,1}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,2}, {}^3q_{M,2}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,2}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^2e_{R,6}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,2}, {}^3q_{M,3}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^3e_{M,2}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,2}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^2e_{M,2}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^3e_{R,1}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,2}, q_{C,1})$
${}^3e_{R,6}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

3.1 ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος είναι η ακόλουθη:

- **Κατεργασία των προϊόντων:** Τα προϊόντα αρχικά κατεργάζονται από το σταθμό κατεργασίας 1, στη συνέχεια, πηγαίνουν για κατεργασία στο σταθμό κατεργασίας 2 και τέλος, η κατεργασία των προϊόντων ολοκληρώνεται στο σταθμό κατεργασίας 3.
- **Μεταφορά των προϊόντων:** Τα ακατέργαστα προϊόντα μεταφέρονται από το ρομποτικό βραχίονα 1 από την παλέτα των ακατέργαστων προϊόντων στον ιμάντα μεταφοράς. Στη συνέχεια, ο ρομποτικός βραχίονας 2 μεταφέρει τα προϊόντα από τον ιμάντα μεταφοράς στην προσωρινή θέση 1. Στη συνέχεια ο ρομποτικός βραχίονας 2 μεταφέρει τα προϊόντα στο σταθμό κατεργασίας 1 και μετά το τέλος της κατεργασίας τα μεταφέρει πίσω στην προσωρινή θέση 1. Στη συνέχεια ο ρομποτικός βραχίονας 2 μεταφέρει τα προϊόντα στο σταθμό κατεργασίας 2 και μετά το τέλος της κατεργασίας τα μεταφέρει πίσω στην προσωρινή θέση 1. Τέλος ο ρομποτικός βραχίονας 2 μεταφέρει τα προϊόντα από την προσωρινή θέση 1 στον ιμάντα μεταφοράς. Ο ρομποτικός βραχίονας 3 μεταφέρει τα προϊόντα από τον ιμάντα μεταφοράς στην προσωρινή θέση 2. Στη συνέχεια ο ρομποτικός βραχίονας 3 μεταφέρει τα προϊόντα στο σταθμό κατεργασίας 3 και μετά το τέλος της κατεργασίας τα μεταφέρει πίσω στην προσωρινή θέση 2. Τέλος ο ρομποτικός βραχίονας 3 μεταφέρει τα προϊόντα από την προσωρινή θέση 2 στον ιμάντα μεταφοράς. Τέλος ο ρομποτικός βραχίονας 1 μεταφέρει τα προϊόντα από τον ιμάντα μεταφοράς στην παλέτα των τελικών προϊόντων.
- **Προδιαγραφές ασφαλείας:**
 - Μόνο εάν ο σταθμός κατεργασίας είναι ανενεργός τότε ο αντίστοιχος ρομποτικός βραχίονας μπορεί να μεταφέρει ένα προϊόν.
 - Μόνο εάν ο ιμάντας μεταφοράς είναι ακίνητος οι ρομποτικοί βραχίονες μπορούν να πάρουν ένα προϊόν από αυτόν ή να αφήσουν ένα προϊόν σε αυτόν.

3.2 ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η γλώσσα η οποία περιγράφει την επιθυμητή συμπεριφορά όσον αφορά τον συντονισμό δηλαδή την κατεργασία και μεταφορά των προϊόντων είναι της μορφής:

$${}^1\mathbb{K}_D = ({}^1e_{R,1} {}^1e_{R,3} e_{C,1} e_{C,2} {}^2e_{R,1} {}^2e_{R,6} {}^2e_{R,2} {}^2e_{R,7} {}^1e_{M,1} {}^1e_{M,2} {}^2e_{R,3} {}^2e_{R,6} {}^2e_{R,2} {}^2e_{R,8} {}^2e_{M,1} {}^2e_{M,2} {}^2e_{R,4} {}^2e_{R,6} {}^2e_{R,2} {}^2e_{R,5} e_{C,1} e_{C,2} {}^3e_{R,1} {}^3e_{R,5} {}^3e_{R,2} {}^3e_{R,6} {}^3e_{M,1} {}^3e_{M,2} {}^3e_{R,3} {}^3e_{R,5} {}^3e_{R,2} {}^3e_{R,4} e_{C,1} e_{C,2} {}^1e_{R,2} {}^1e_{R,4})^*$$

Η ελεγχιμότητα της γλώσσας ${}^1\mathbb{K}_D$ ως προς το συνολικό αυτόματο \mathbf{G} εξασφαλίζεται από το γεγονός ότι ως προς μη ελέγξιμα συμβάντα ${}^1e_{M,2}$, ${}^2e_{M,2}$ και ${}^3e_{M,2}$ τα συμβάντα αυτά εμφανίζονται στη μορφή ${}^1e_{M,1} {}^1e_{M,2}$, ${}^2e_{M,1} {}^2e_{M,2}$ και ${}^3e_{M,1} {}^3e_{M,2}$.

Οι γλώσσες οι οποίες περιγράφουν την επιθυμητή συμπεριφορά όσον αφορά τις προδιαγραφές λειτουργίας είναι της μορφής:

Για την πρώτη προδιαγραφή ασφαλείας:

$${}^{2,1}\mathbb{K}_D = ({}^2e_{R,2} (({}^1e_{M,1} {}^1e_{M,2})^* {}^2e_{R,7} + ({}^2e_{M,1} {}^2e_{M,2})^* {}^2e_{R,8}))^*$$

$${}^{2,2}\mathbb{K}_D = ({}^3e_{R,2} ({}^3e_{M,1} {}^3e_{M,2})^* {}^3e_{R,6})^*$$

Η ελεγχιμότητα της γλώσσας ${}^{2,1}\mathbb{K}_D$ ως προς το συνολικό αυτόματο \mathbf{G} εξασφαλίζεται από το γεγονός ότι ως προς μη ελέγξιμα συμβάντα ${}^1e_{M,2}$ και ${}^2e_{M,2}$ τα συμβάντα αυτά εμφανίζονται στη μορφή ${}^1e_{M,1} {}^1e_{M,2}$ και ${}^2e_{M,1} {}^2e_{M,2}$.

Η ελεγχιμότητα της γλώσσας ${}^{2,2}\mathbb{K}_D$ ως προς το συνολικό αυτόματο \mathbf{G} εξασφαλίζεται από το γεγονός ότι ως προς μη ελέγξιμο συμβάν ${}^3e_{M,2}$ τα συμβάντα αυτά εμφανίζονται στη μορφή ${}^3e_{M,1} {}^3e_{M,2}$.

Για τη δεύτερη προδιαγραφή ασφαλείας:

$${}^3\mathbb{K}_D = \left(({}^1e_{R,2} + {}^1e_{R,3} + {}^2e_{R,1} + {}^2e_{R,5} + {}^3e_{R,1} + {}^3e_{R,4})^* e_{C,1} e_{C,2} \right)^*$$

Η ελεγχιμότητα της γλώσσας ${}^3\mathbb{K}_D$ ως προς το συνολικό αυτόματο \mathbf{G} εξασφαλίζεται από το γεγονός ότι όλα τα συμβάντα της γλώσσας είναι ελέγξιμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΕΠΟΠΤΕΣ ΤΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

4.1 ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟ

Για την επιθυμητή γλώσσα ${}^1\mathbb{K}_D$ σύμφωνα με τον σχεδιασμό [4] ο επόπτης είναι της μορφής

$${}^1\mathbf{S} = ({}^1\mathbb{Q}_S, {}^1\mathbb{E}_S, {}^1f_S, {}^1\mathbb{H}_S, {}^1x_{S,0}, {}^1\mathbb{Q}_{S,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$${}^1\mathbb{Q}_S = \bigcup_{i=1}^{36} \{q_{S,i}\}$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$${}^1\mathbb{E}_S = \{e_{C,1}, e_{C,2}, {}^1e_{R,1}, {}^1e_{R,2}, {}^1e_{R,3}, {}^1e_{R,4}, {}^2e_{R,1}, {}^2e_{R,2}, {}^2e_{R,3}, {}^2e_{R,4}, {}^2e_{R,5}, {}^2e_{R,6}, {}^2e_{R,7}, {}^2e_{R,8}, {}^3e_{R,1}, {}^3e_{R,2}, {}^3e_{R,3}, {}^3e_{R,4}, {}^3e_{R,5}, {}^3e_{R,6}, {}^1e_{M,1}, {}^1e_{M,2}, {}^2e_{M,1}, {}^2e_{M,2}, {}^3e_{M,1}, {}^3e_{M,2}\}$$

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$\begin{aligned} {}^1f_S(q_{S,1}, {}^1e_{R,1}) &= q_{S,2}, {}^1f_S(q_{S,2}, {}^1e_{R,3}) = q_{S,3}, {}^1f_S(q_{S,3}, e_{C,1}) = q_{S,4}, {}^1f_S(q_{S,4}, e_{C,2}) = q_{S,5}, \\ {}^1f_S(q_{S,5}, {}^2e_{R,1}) &= q_{S,6}, {}^1f_S(q_{S,6}, {}^2e_{R,6}) = q_{S,7}, {}^1f_S(q_{S,7}, {}^2e_{R,2}) = q_{S,8}, {}^1f_S(q_{S,8}, {}^2e_{R,7}) = q_{S,9}, \\ {}^1f_S(q_{S,9}, {}^1e_{M,1}) &= q_{S,10}, {}^1f_S(q_{S,10}, {}^1e_{M,2}) = q_{S,11}, {}^1f_S(q_{S,11}, {}^2e_{R,3}) = q_{S,12}, \\ {}^1f_S(q_{S,12}, {}^2e_{R,6}) &= q_{S,13}, {}^1f_S(q_{S,13}, {}^2e_{R,2}) = q_{S,14}, {}^1f_S(q_{S,14}, {}^2e_{R,8}) = q_{S,15}, \\ {}^1f_S(q_{S,15}, {}^2e_{M,1}) &= q_{S,16}, {}^1f_S(q_{S,16}, {}^2e_{M,2}) = q_{S,17}, {}^1f_S(q_{S,17}, {}^2e_{R,4}) = q_{S,18}, \\ {}^1f_S(q_{S,18}, {}^2e_{R,6}) &= q_{S,19}, {}^1f_S(q_{S,19}, {}^2e_{R,2}) = q_{S,20}, {}^1f_S(q_{S,20}, {}^2e_{R,5}) = q_{S,21}, \\ {}^1f_S(q_{S,21}, e_{C,1}) &= q_{S,22}, {}^1f_S(q_{S,22}, e_{C,2}) = q_{S,23}, {}^1f_S(q_{S,23}, {}^3e_{R,1}) = q_{S,24}, {}^1f_S(q_{S,24}, {}^3e_{R,5}) = q_{S,25}, \\ {}^1f_S(q_{S,25}, {}^3e_{R,2}) &= q_{S,26}, {}^1f_S(q_{S,26}, {}^3e_{R,6}) = q_{S,27}, {}^1f_S(q_{S,27}, {}^3e_{M,1}) = q_{S,28}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^1f_S({}^1q_{S,28}, {}^3e_{M,2}) &= {}^1q_{S,29}, {}^1f_S({}^1q_{S,29}, {}^3e_{R,3}) = {}^1q_{S,30}, {}^1f_S({}^1q_{S,30}, {}^3e_{R,5}) = {}^1q_{S,31}, \\
{}^1f_S({}^1q_{S,31}, {}^3e_{R,2}) &= {}^1q_{S,32}, {}^1f_S({}^1q_{S,32}, {}^3e_{R,4}) = {}^1q_{S,33}, {}^1f_S({}^1q_{S,33}, e_{C,1}) = {}^1q_{S,34}, {}^1f_S({}^1q_{S,34}, e_{C,2}) = {}^1q_{S,35} \\
&, {}^1f_S({}^1q_{S,35}, {}^1e_{R,2}) = {}^1q_{S,36} \text{ και } {}^1f_S({}^1q_{S,36}, {}^1e_{R,4}) = {}^1q_{S,1}
\end{aligned}$$

Τα σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

$$\begin{aligned}
{}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,1}) &= \{e_{R,1}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,2}) = \{e_{R,3}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,3}) = \{e_{C,1}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,4}) = \{e_{C,2}\}, \\
{}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,5}) &= \{e_{R,1}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,6}) = \{e_{R,6}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,7}) = \{e_{R,2}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,8}) = \{e_{R,7}\}, \\
{}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,9}) &= \{e_{M,1}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,10}) = \{e_{M,2}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,11}) = \{e_{R,3}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,12}) = \{e_{R,6}\}, \\
{}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,13}) &= \{e_{R,2}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,14}) = \{e_{R,8}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,15}) = \{e_{M,1}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,16}) = \{e_{M,2}\}, \\
{}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,17}) &= \{e_{R,4}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,18}) = \{e_{R,6}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,19}) = \{e_{R,2}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,20}) = \{e_{R,5}\}, \\
{}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,21}) &= \{e_{C,1}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,22}) = \{e_{C,2}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,23}) = \{e_{R,1}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,24}) = \{e_{R,5}\}, \\
{}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,25}) &= \{e_{R,2}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,26}) = \{e_{R,6}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,27}) = \{e_{M,1}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,28}) = \{e_{M,2}\}, \\
{}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,29}) &= \{e_{R,3}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,30}) = \{e_{R,5}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,31}) = \{e_{R,2}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,32}) = \{e_{R,4}\}, \\
{}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,33}) &= \{e_{C,1}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,34}) = \{e_{C,2}\}, {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,35}) = \{e_{R,2}\} \text{ και } {}^1\mathbb{H}_S({}^1q_{S,36}) = \{e_{R,4}\}
\end{aligned}$$

Η αρχική κατάσταση είναι ${}^1x_{S,0} = {}^1q_{S,1}$.

Το σύνολο το σημαδεμένων καταστάσεων είναι ${}^1Q_{S,m} = {}^1Q_S$.

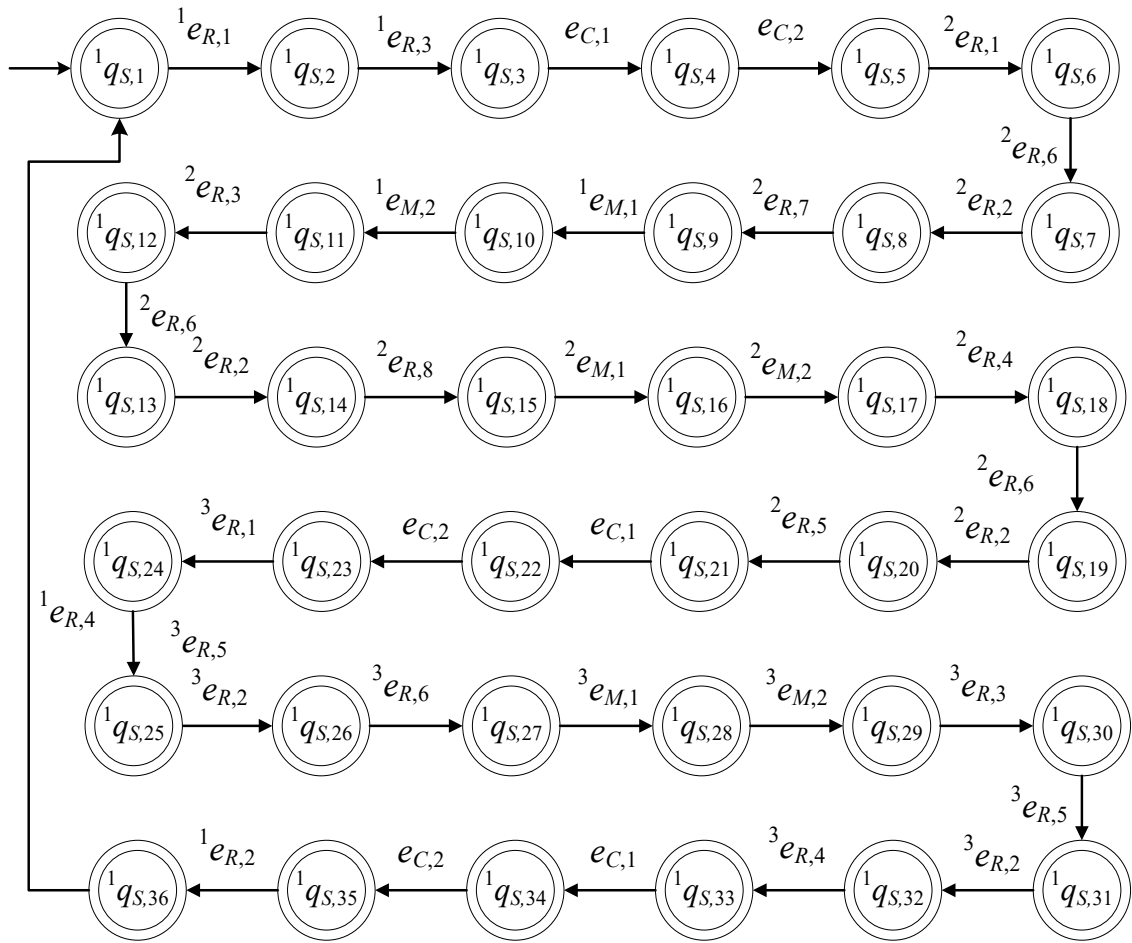
Η γλώσσα που παράγει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}({}^1\mathbf{S}_R) = \frac{({}^1e_{R,1} {}^1e_{R,3} e_{C,1} e_{C,2} {}^2e_{R,1} {}^2e_{R,6} {}^2e_{R,2} {}^2e_{R,7} {}^1e_{M,1} {}^1e_{M,2} {}^2e_{R,3} {}^2e_{R,6} {}^2e_{R,2} {}^2e_{R,8} {}^2e_{M,1} {}^2e_{M,2} \\
{}^2e_{R,4} {}^2e_{R,6} {}^2e_{R,2} {}^2e_{R,5} e_{C,1} e_{C,2} {}^3e_{R,1} {}^3e_{R,5} {}^3e_{R,2} {}^3e_{R,6} \\
{}^3e_{M,1} {}^3e_{M,2} {}^3e_{R,3} {}^3e_{R,5} {}^3e_{R,2} {}^3e_{R,4} e_{C,1} e_{C,2} {}^1e_{R,2} {}^1e_{R,4})^*}$$

Τέλος η γλώσσα που σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}_m({}^1\mathbf{S}_R) = \frac{({}^1e_{R,1} {}^1e_{R,3} e_{C,1} e_{C,2} {}^2e_{R,1} {}^2e_{R,6} {}^2e_{R,2} {}^2e_{R,7} {}^1e_{M,1} {}^1e_{M,2} {}^2e_{R,3} {}^2e_{R,6} {}^2e_{R,2} {}^2e_{R,8} {}^2e_{M,1} {}^2e_{M,2} \\
{}^2e_{R,4} {}^2e_{R,6} {}^2e_{R,2} {}^2e_{R,5} e_{C,1} e_{C,2} {}^3e_{R,1} {}^3e_{R,5} {}^3e_{R,2} {}^3e_{R,6} \\
{}^3e_{M,1} {}^3e_{M,2} {}^3e_{R,3} {}^3e_{R,5} {}^3e_{R,2} {}^3e_{R,4} e_{C,1} e_{C,2} {}^1e_{R,2} {}^1e_{R,4})^*}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Το αυτόματο του επόπτη 1S

4.2 ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Για την επιθυμητή γλώσσα ${}^{2,1}\mathbb{K}_D$ σύμφωνα με τον σχεδιασμό [4] ο επόπτης είναι της μορφής

$${}^{2,1}\mathbf{S} = ({}^{2,1}\mathbb{Q}_S, {}^{2,1}\mathbb{E}_S, {}^{2,1}f_S, {}^{2,1}\mathbb{H}_S, {}^{2,1}x_{S,0}, {}^{2,1}\mathbb{Q}_{S,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$${}^{2,1}\mathbb{Q}_S = \{{}^{2,1}q_{S,1}, {}^{2,1}q_{S,2}, {}^{2,1}q_{S,3}, {}^{2,1}q_{S,4}\}$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$${}^{2,1}\mathbb{E}_S = \{{}^2e_{R,2}, {}^2e_{R,7}, {}^2e_{R,8}, {}^1e_{M,1}, {}^1e_{M,2}, {}^2e_{M,1}, {}^2e_{M,2}\}$$

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$\begin{aligned}
{}^{2,1}f_S({}^{2,1}q_{S,1}, {}^2e_{R,2}) &= {}^{2,1}q_{S,2}, \quad {}^{2,1}f_S({}^{2,1}q_{S,2}, {}^1e_{M,1}) = {}^{2,1}q_{S,3}, \quad {}^{2,1}f_S({}^{2,1}q_{S,2}, {}^2e_{M,1}) = {}^{2,1}q_{S,4}, \\
{}^{2,1}f_S({}^{2,1}q_{S,2}, {}^2e_{R,7}) &= {}^{2,1}q_{S,1}, \quad {}^{2,1}f_S({}^{2,1}q_{S,2}, {}^2e_{R,8}) = {}^{2,1}q_{S,1}, \quad {}^{2,1}f_S({}^{2,1}q_{S,3}, {}^1e_{M,2}) = {}^{2,1}q_{S,2} \text{ και} \\
{}^{2,1}f_S({}^{2,1}q_{S,4}, {}^2e_{M,2}) &= {}^{2,1}q_{S,2}
\end{aligned}$$

Τα σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

$$\begin{aligned}
{}^{2,1}\mathbb{H}_S({}^{2,1}q_{S,1}) &= \{{}^2e_{R,2}\}, \quad {}^{2,1}\mathbb{H}_S({}^{2,1}q_{S,2}) = \{{}^2e_{R,7}, {}^2e_{R,8}, {}^1e_{M,1}, {}^2e_{M,1}\}, \quad {}^{2,1}\mathbb{H}_S({}^{2,1}q_{S,3}) = \{{}^1e_{M,2}\} \text{ και} \\
{}^{2,1}\mathbb{H}_S({}^{2,1}q_{S,4}) &= \{{}^2e_{M,2}\}
\end{aligned}$$

Η αρχική κατάσταση είναι ${}^{2,1}x_{S,0} = {}^{2,1}q_{S,1}$.

Το σύνολο το σημαδεμένων καταστάσεων είναι ${}^{2,1}Q_{S,m} = {}^{2,1}Q_S$.

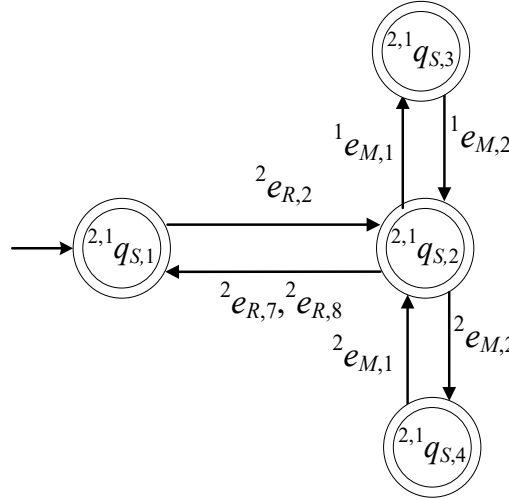
Η γλώσσα που παράγει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}({}^{2,1}\mathbf{S}_R) = \overline{\left({}^2e_{R,2} \left(({}^1e_{M,1} {}^1e_{M,2})^* {}^2e_{R,7} + ({}^2e_{M,1} {}^2e_{M,2})^* {}^2e_{R,8} \right) \right)^*}$$

Τέλος η γλώσσα που σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}_m({}^{2,1}\mathbf{S}_R) = \overline{\left({}^2e_{R,2} \left(({}^1e_{M,1} {}^1e_{M,2})^* {}^2e_{R,7} + ({}^2e_{M,1} {}^2e_{M,2})^* {}^2e_{R,8} \right) \right)^*}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Το αυτόματο του επόπτη ${}^{2,1}\mathbf{S}$

4.3 ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Για την επιθυμητή γλώσσα ${}^{2,2}\mathbb{K}_D$ σύμφωνα με τον σχεδιασμό [4] ο επόπτης είναι της μορφής

$${}^{2,2}\mathbf{S} = ({}^{2,2}\mathbb{Q}_S, {}^{2,2}\mathbb{E}_S, {}^{2,2}f_S, {}^{2,2}\mathbb{H}_S, {}^{2,2}x_{S,0}, {}^{2,2}\mathbb{Q}_{S,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$${}^{2,2}\mathbb{Q}_S = \{{}^{2,2}q_{S,1}, {}^{2,2}q_{S,2}, {}^{2,2}q_{S,3}\}$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$${}^{2,2}\mathbb{E}_S = \{{}^3e_{R,2}, {}^3e_{R,6}, {}^3e_{M,1}, {}^3e_{M,2}\}$$

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$\begin{aligned} {}^{2,2}f_S({}^{2,2}q_{S,1}, {}^3e_{R,2}) &= {}^{2,2}q_{S,2}, \quad {}^{2,2}f_S({}^{2,2}q_{S,2}, {}^3e_{M,1}) = {}^{2,2}q_{S,3}, \quad {}^{2,2}f_S({}^{2,2}q_{S,2}, {}^3e_{R,6}) = {}^{2,2}q_{S,1} \text{ και} \\ {}^{2,2}f_S({}^{2,2}q_{S,3}, {}^3e_{M,2}) &= {}^{2,2}q_{S,2} \end{aligned}$$

Τα σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

$${}^{2,2}\mathbb{H}_S({}^{2,2}q_{S,1}) = \{{}^3e_{R,2}\}, \quad {}^{2,2}\mathbb{H}_S({}^{2,2}q_{S,2}) = \{{}^3e_{R,6}, {}^3e_{M,1}\} \text{ και } {}^{2,2}\mathbb{H}_S({}^{2,2}q_{S,3}) = \{{}^3e_{M,2}\}$$

Η αρχική κατάσταση είναι ${}^{2,2}x_{S,0} = {}^{2,2}q_{S,1}$.

Το σύνολο το σημαδεμένων καταστάσεων είναι ${}^{2,2}\mathbb{Q}_{S,m} = {}^{2,2}\mathbb{Q}_S$.

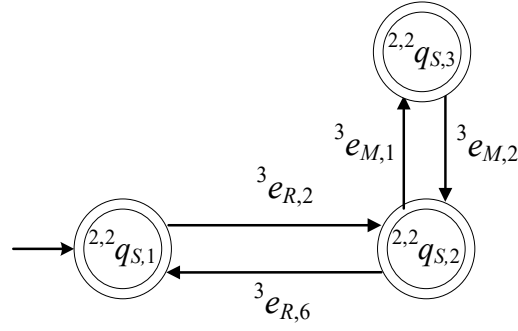
Η γλώσσα που παράγει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}({}^{2,2}\mathbf{S}_R) = \overline{({}^3e_{R,2}({}^3e_{M,1} {}^3e_{M,2})^* {}^3e_{R,6})^*}$$

Τέλος η γλώσσα που σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}_m({}^{2,2}\mathbf{S}_R) = \overline{({}^3e_{R,2}({}^3e_{M,1} {}^3e_{M,2})^* {}^3e_{R,6})^*}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Το αυτόματο του επόπτη $^{2,2}\mathbf{S}$

4.4 ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΡΙΤΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Για την επιθυμητή γλώσσα $^3\mathbb{K}_D$ σύμφωνα με τον σχεδιασμό [4] ο επόπτης είναι της μορφής

$$^3\mathbf{S} = (^3\mathbb{Q}_S, ^3\mathbb{E}_S, ^3f_S, ^3\mathbb{H}_S, ^3x_{S,0}, ^3\mathbb{Q}_{S,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$^3\mathbb{Q}_S = \{^3q_{S,1}, ^3q_{S,2}\}$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$^3\mathbb{E}_S = \{^1e_{R,2}, ^1e_{R,3}, ^2e_{R,1}, ^2e_{R,5}, ^3e_{R,1}, ^3e_{R,4}, e_{C,1}, e_{C,2}\}$$

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$\begin{aligned} ^3f_S(^3q_{S,1}, ^1e_{R,2}) &= ^3q_{S,1}, \quad ^3f_S(^3q_{S,1}, ^1e_{R,3}) = ^3q_{S,1}, \quad ^3f_S(^3q_{S,1}, ^2e_{R,1}) = ^3q_{S,1}, \quad ^3f_S(^3q_{S,1}, ^2e_{R,5}) = ^3q_{S,1}, \\ ^3f_S(^3q_{S,1}, ^3e_{R,1}) &= ^3q_{S,1}, \quad ^3f_S(^3q_{S,1}, ^3e_{R,4}) = ^3q_{S,1}, \quad ^3f_S(^3q_{S,1}, e_{C,1}) = ^3q_{S,2} \quad \text{και} \quad ^3f_S(^3q_{S,2}, e_{C,2}) = ^3q_{S,1} \end{aligned}$$

Τα σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

$$^3\mathbb{H}_S(^3q_{S,1}) = \{^1e_{R,2}, ^1e_{R,3}, ^2e_{R,1}, ^2e_{R,5}, ^3e_{R,1}, ^3e_{R,4}, e_{C,1}\} \quad \text{και} \quad ^3\mathbb{H}_S(^3q_{S,2}) = \{e_{C,2}\}$$

Η αρχική κατάσταση είναι $^3x_{S,0} = ^3q_{S,1}$.

Το σύνολο το σημαδεμένων καταστάσεων είναι $^3\mathbb{Q}_{S,m} = ^3\mathbb{Q}_S$.

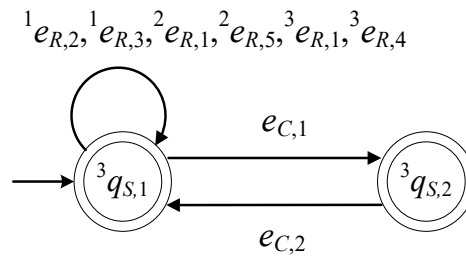
Η γλώσσα που παράγει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}({}^3\mathbf{S}_R) = \overline{\left(({}^1e_{R,2} + {}^1e_{R,3} + {}^2e_{R,1} + {}^2e_{R,5} + {}^3e_{R,1} + {}^3e_{R,4})^* e_{C,1} e_{C,2} \right)^*}$$

Τέλος η γλώσσα που σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}_m({}^3\mathbf{S}_R) = \overline{\left(({}^1e_{R,2} + {}^1e_{R,3} + {}^2e_{R,1} + {}^2e_{R,5} + {}^3e_{R,1} + {}^3e_{R,4})^* e_{C,1} e_{C,2} \right)^*}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Το αυτόματο του επόπτη ${}^3\mathbf{S}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΤΟΣ ΕΠΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΥ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ

5.1 ΤΟ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟ ΑΥΤΟΜΑΤΟ

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκε το συνολικό σύστημα του βιομηχανικού συστήματος κατεργασίας. Οι επόπτες που σχεδιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 θα εφαρμοστούν απευθείας στο συνολικό αυτόματο G ακόμα και εάν στους επόπτες αυτούς δεν συμμετέχουν συμβάντα κάποιων υποσυστημάτων. Έτσι το ελεγχόμενο αυτόματο προκύπτει από την πολυμελή πράξη της παράλληλης σύνδεσης του συστήματος με όλους τους επόπτες που αναπτύχθηκαν. Ισχύει ότι

$$G_e = G \parallel {}^1S \parallel {}^{2,1}S \parallel {}^{2,2}S \parallel {}^3S$$

Οι επόπτες που σχεδιάστηκαν έχουν την ιδιότητα να επιστρέφουν τα υποσυστήματα πάντα στην αρχική κατάσταση τους επομένως εξασφαλίζεται ότι από κάθε κατάσταση το αυτόματο μπορεί να επιστρέψει στην αρχική κατάσταση δηλαδή στην σημαδεμένη κατάσταση. Συνεπώς το ελεγχόμενο αυτόματο αποφεύγει τον εγκλωβισμό.

5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΥ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ

Έστω ότι στο σύστημα εφαρμόζεται η αλληλουχία συμβάντων ${}^1e_{R,1}e_{C,1}e_{C,2}{}^1e_{R,3}{}^1e_{M,1}{}^1e_{M,2}{}^2e_{M,1}{}^3e_{M,1}{}^2e_{R,1}{}^2e_{R,6}{}^3e_{M,2}{}^2e_{M,2}{}^3e_{R,1}{}^3e_{R,6}$ στο αυτόματο G_e .

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η προσομοίωση του συστήματος.

Πίνακας 2: Προσομοίωση της μονάδας κατεργασίας

Συμβάντα αλληλουχίας	Καταστάσεις
	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^1e_{R,1}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,2}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$

$e_{C,1}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,2}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,2})$
$e_{C,2}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,2}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^1e_{R,3}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^1e_{M,1}$	$({}^1q_{M,2}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^1e_{M,2}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^2e_{M,1}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,2}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^3e_{M,1}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,2}, {}^3q_{M,2}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^2e_{R,1}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,2}, {}^3q_{M,2}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^2e_{R,6}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,2}, {}^3q_{M,2}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^3e_{M,2}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,2}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^2e_{M,2}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$
${}^3e_{R,1}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,2}, q_{C,1})$
${}^3e_{R,6}$	$({}^1q_{M,1}, {}^2q_{M,1}, {}^3q_{M,1}, {}^1q_{R,1}, {}^2q_{R,1}, {}^3q_{R,1}, q_{C,1})$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε ένα βιομηχανικό σύστημα κατεργασίας. Αρχικά παρουσιάστηκε η μοντελοποίηση όλων των υποσυστημάτων του συστήματος με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων. Στη συνέχεια μέσω της παράλληλης σύνδεσης παρουσιάστηκε το συνολικό μοντέλο του συστήματος. Η επιθυμητή συμπεριφορά του βιομηχανικού συστήματος τόσο από πλευράς συντονισμού των υποσυστημάτων όσο και από πλευράς προδιαγραφών ασφαλείας παρουσιάστηκε στη μορφή κανόνων. Στη συνέχεια η επιθυμητή συμπεριφορά παρουσιάστηκε στη μορφή κανονικών γλωσσών για τις οποίες αποδείχτηκε η ελεγκσιμότητα σε ότι αφορά το συνολικό αυτόματο. Σύμφωνα με τις επιθυμητές κανονικές γλώσσες πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός μίας δομοστοιχειωτής αρχιτεκτονικής ελέγχου η οποία αποφεύγει τον εγκλωβισμό. Συνεπώς σχεδιάστηκαν επόπτες ελεγκτές οι οποίοι σηματοδούν και παράγουν τις επιθυμητές κανονικές γλώσσες. Τέλος πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση του ελεγχόμενου αυτόματου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. I. Barragan-Vite, J. C. Seck-Tuoh-Mora, N. Hernandez-Romero, J. Medina-Marin and E. S. Hernandez-Gress, "Distributed Control of a Manufacturing System with One-Dimensional Cellular Automata," *Advances in Modelling, Monitoring, and Control for Complex Industrial Systems*, Volume 2018, 20118.
2. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and N. C. Kyriazis, "A two layer supervisor scheme for ring manufacturing production chains," *Proceedings of the SouthEast European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference*, pp. 48-52, 2016.
3. A. Nooruldeen and K. W. Schmidt, "Order-Preserving Languages for the Supervisory Control of Automated Manufacturing Systems," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 131901-131919, 2020.
4. C. G. Casandras and S. Lafortune, *Introduction to Discrete Event Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1999.
5. W. M. Wonham and C. Kai, *Supervisory control of discrete-event systems*, Springer International Publishing, 2019.
6. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and A. N. Menexis, "Supervisory Control for Flexibility of Production Manufacturing Processes," *IEEE 21st International Conference on Intelligent Engineering Systems 2017 (INES 2017)*, Larnaca, October, 20-23, Cyprus, 2017.
7. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and K. A. Ioannou, "Control of Router Nodes in Production Manufacturing Processes," *International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*, May 7-9, Thessaloniki, Greece, 2018.
8. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and V. Ch. Michalainas, "Modular supervisory control for mining process elevator systems," *International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*, May 4-6, Thessaloniki, Greece, 2017.
9. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and G. K. Diveris, "Function Supervisors for Storage Systems," *International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*, May 7-9, Thessaloniki, Greece, 2018.
10. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and N. C. Kyriazis, "A two layer supervisor scheme for ring manufacturing production chains," *Proceedings of the SouthEast European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference*, pp. 48-52, 2016.