



NATIONAL AND KAPODISTRIAN UNIVERSITY OF ATHENS

CORE DEPARTMENT

MSc THESIS

**Design of a Non-Blocking Modular Supervisory Control
Architecture for a Small Scale Manufacturing Station**

Evanthia Grigoropoulou

Supervisor:

Fotis N. Koumboulis, Professor

2024



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

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

Αναλυτικός Σχεδιασμός Δομοστοιχειωτής Αρχιτεκτονικής
Εποπτικού Ελέγχου που αποφεύγει τον εγκλωβισμό για
έναν σταθμό κατεργασίας μικρής κλίμακας

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 την

Ευανθία Γρηγοροπούλου

2024

«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. Φώτιος Ν. Κουμπουλής, Καθηγητής(Επιβλέπων)
2. Νικόλαος Δ. Κούβακας, Αναπληρωτής 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.»

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».

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιαστεί το μαθηματικό μοντέλο ενός σταθμού κατεργασίας της Festo Didactic το οποίο αποτελείται από ένα περιστροφικό τραπέζι (turntable), μία συσκευή ελέγχου (tester), μία συσκευή διάτρησης (drill), έναν σφιγκτήρα (clamp) και μία συσκευή προώθησης των προϊόντων (ejector). Θα παρουσιαστούν τα μαθηματικά μοντέλα των υποσυστημάτων του συστήματος. Θα αναπτυχθεί το συνολικό μοντέλο του συστήματος. Θα παρουσιαστούν όλες οι προδιαγραφές λειτουργίας, ασφαλείας και συντονισμού των υποσυστημάτων. Θα παρουσιαστούν οι επιθυμητές συμπεριφορές σε μορφή επιθυμητών κανονικών γλωσσών. Θα διερευνηθούν οι ιδιότητες των επιθυμητών γλωσσών ως προς το συνολικό αυτόματο του συστήματος. Θα διερευνηθεί η δυνατότητα αναλυτικού σχεδιασμού μιας δομοστοιχειωτής αρχιτεκτονικής εποπτικού ελέγχου που αποφεύγει τον εγκλωβισμό.

Λέξεις κλειδιά: Πεπερασμένα ντετερμινιστικά αυτόματα, Σταθμός Παραγωγής, Εποπτικός Έλεγχος

Abstract

In this thesis, the mathematical model of a Festo Didactic production station will be presented, which consists of a turntable, a tester, a drill, a clamp and a device for advancing the products (ejector). The mathematical models of the subsystems of the system will be presented. The overall system model will be developed. All operating, safety and coordination specifications of the subsystems will be presented. Desired behaviors will be presented in the form of desired regular languages. The properties of the desired languages in terms of the overall automaton of the system will be investigated. The feasibility of analytically designing a modular supervisory control architecture that avoids deadlocks will be explored.

Keywords: Finite Deterministic Automata, Production station, Supervisor Control

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	3
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	3
2.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	5
2.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	6
2.4 ΤΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	11
3.1 ΚΑΝΟΝΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	11
3.2 ΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ	15
4.1 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,1}$	15
4.2 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,2,1}$	16
4.3 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,3}$	17
4.4 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,4}$	18
4.5 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,5}$	20
4.6 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,6,1}$	21
4.7 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,7}$	22
4.8 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,8}$	23
4.9 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,9}$	25
4.10 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,10,1}$	26

4.11 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,11}$	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	30
REFERENCES.....	31

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Εκπαιδευτική διάταξη [1]	3
Σχήμα 2: Σταθμός παραγωγής (www.fest.com).....	4
Σχήμα 3: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ενεργοποιητή	6
Σχήμα 4: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του αισθητήρα	7
Σχήμα 5: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του αισθητήρα του τρυπανιού	9
Σχήμα 6: Επόπτης S_1	16
Σχήμα 7: Επόπτης S_2	17
Σχήμα 8: Επόπτης S_3	18
Σχήμα 9: Επόπτης S_4	19
Σχήμα 10: Επόπτης S_5	21
Σχήμα 11: Επόπτης S_6	22
Σχήμα 12: Επόπτης S_7	23
Σχήμα 13: Επόπτης S_8	24
Σχήμα 14: Επόπτης S_9	26
Σχήμα 15: Επόπτης S_{10}	27
Σχήμα 16: Επόπτης S_{11}	28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιαστεί το μαθηματικό μοντέλο ενός σταθμού κατεργασίας της Festo Didactic το οποίο αποτελείται από ένα περιστροφικό τραπέζι (turntable), μία συσκευή ελέγχου (tester), μία συσκευή διάτρησης (drill), έναν σφιγκτήρα (clamp) και μία συσκευή προώθησης των προϊόντων (ejector). Θα παρουσιαστούν τα μαθηματικά μοντέλα των υποσυστημάτων του συστήματος. Θα αναπτυχθεί το συνολικό μοντέλο του συστήματος. Θα παρουσιαστούν όλες οι προδιαγραφές λειτουργίας, ασφαλείας και συντονισμού των υποσυστημάτων. Θα παρουσιαστούν οι επιθυμητές συμπεριφορές σε μορφή επιθυμητών κανονικών γλωσσών. Θα διερευνηθούν οι ιδιότητες των επιθυμητών γλωσσών ως προς το συνολικό αυτόματο του συστήματος. Θα διερευνηθεί η δυνατότητα αναλυτικού σχεδιασμού μιας δομοστοιχειωτής αρχιτεκτονικής εποπτικού ελέγχου που αποφεύγει τον εγκλωβισμό.

Τα ευέλικτα συστήματα παραγωγής συναντώνται αρκετά συχνά στη σύγχρονη βιομηχανία (βλ. [1] και [2]). Ο έλεγχος των συστημάτων αυτών απαιτεί τον σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου τα οποία να μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν στις πιθανές αλλαγές της επιθυμητής δομής της παραγωγής (βλ. [1]). Στην εργασία [2] παρουσιάζεται ένα σύστημα παραγωγής μικρής κλίμακας που αποτελείται από μία κυκλική τράπεζα και έναν αριθμό συσκευών κατεργασίας και μεταφοράς. Στην εργασία [1] παρουσιάζεται μία πολυεπίπεδη δομοστοιχειωτή αρχιτεκτονική ελέγχου του συστήματος βασισμένη σε λογικές προτάσεις και αυτόματα αναφοράς. Η αναλυτική παρουσίαση της επιθυμητής συμπεριφοράς στη μορφή κανονικών γλωσσών, η διερεύνηση των ιδιοτήτων των γλωσσών αυτών ως προς το συνολικό αυτόματο αλλά και μεταξύ τους καθώς και η πραγματοποίηση της αρχιτεκτονικής εποπτικού ελέγχου που αντιστοιχεί είναι υπό διερεύνηση (ενδεικτικά βλ. τις εργασίες [3]-[4]).

Στην παρούσα εργασία η μοντελοποίηση των συστημάτων θα πραγματοποιηθεί με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων καθώς με χρήση των πολυμελών πράξεων μεταξύ των αυτόματων. Η επιθυμητές συμπεριφορές θα προσδιοριστούν σε μορφή επιθυμητών γλωσσών σε αναλυτική μορφή. Ο σχεδιασμός της δομοστοιχειωτής αρχιτεκτονικής εποπτικού ελέγχου θα γίνει με χρήση δυναμικών εποπτών που βασίζονται στις επιμέρους επιθυμητές γλώσσες. Θα μελετηθούν οι ιδιότητες των γλωσσών ώστε να ικανοποιούνται ικανές συνθήκες για την επίλυση του προβλήματος του δομοστοιχειωτού ελέγχου. Ο σχεδιασμός της δομοστοιχειωτής αρχιτεκτονικής εποπτικού ελέγχου θα γίνει με χρήση δυναμικών εποπτών σε αναλυτική μορφή.

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

Στο Κεφάλαιο 2 θα παρουσιαστεί η περιγραφή του συστήματος και το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος και των υποσυστήματος.

Στο Κεφάλαιο 3 θα παρουσιαστεί η επιθυμητή συμπεριφορά και θα οριστούν οι κανονικές επιθυμητές γλώσσες.

Στο Κεφάλαιο 4 θα σχεδιαστούν οι επόπτες του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί μία εκπαιδευτική διάταξη η οποία είναι μια γραμμή παραγωγής μικρής κλίμακας που αποτελείται από έξι σταθμούς, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Το σύστημα παράγεται από την εταιρεία Festo Didactic (www.festo.com).



Σχήμα 1: Εκπαιδευτική διάταξη [1]

Η γραμμή παραγωγής έχει αναπτυχθεί για εκπαίδευση και έρευνα στον τομέα του αυτοματισμού και των επικοινωνιών τόσο σε προπτυχιακό όσο και σε μεταπτυχιακό επίπεδο. Αν και το σύστημα είναι κατασκευασμένο από βιομηχανικά εξαρτήματα, δεν πραγματοποιείται πραγματική επεξεργασία. Ωστόσο, όλες οι κινήσεις, οι ταχύτητες και οι χρονισμοί είναι σαν να υπήρχαν πραγματικά προϊόντα προς παραγωγή. Διάφοροι τύποι πνευματικών κυλίνδρων και κινητήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται ως ενεργοποιητές. Επίσης, χρησιμοποιούνται οπτικοί αισθητήρες, επαγωγικοί αισθητήρες, χωρητικοί αισθητήρες, ηλεκτρομηχανικοί αισθητήρες, αισθητήρες επαφής και αισθητήρες τύπου Hall. Συνολικά, η γραμμή παραγωγής περιέχει 28 ενεργοποιητές που ελέγχονται από ένα εποπτικό σύστημα ελέγχου και 59 αισθητήρες.

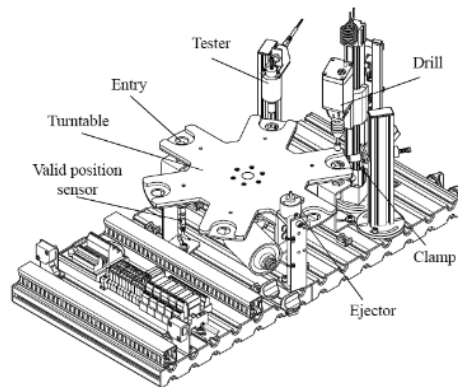
Η επιθυμητή ελεγχόμενη συμπεριφορά της γραμμής παραγωγής είναι η εξής. Τα προϊόντα εισέρχονται στη γραμμή παραγωγής μέσω του σταθμού διανομής, όπου έχουν αρχικά τοποθετηθεί σε τρεις σωλήνες αποθήκευσης. Τα προϊόντα φεύγουν από τους σωλήνες αποθήκευσης μέσω ωστηρίων. Μια πνευματική λαβή, που ανήκει στο σταθμό χειρισμού, μεταφέρει τα προϊόντα στην ενδιάμεση προσωρινή θέση αποθήκευσης (buffer). Από την

ενδιάμεση προσωρινή θέση αποθήκευσης (buffer), ένας κύλινδρος μεταφοράς παραλαμβάνει τα προϊόντα και τα τοποθετεί στο πλατό του ανελκυστήρα στο σταθμό δοκιμών. Στο σταθμό δοκιμής, μετράται το ύψος των προϊόντων και τα σωστά προϊόντα μετακινούνται μέσω πνευματικής ολίσθησης προς τον σταθμό αποθήκευσης. Τα προϊόντα που απορρίφθηκαν τοποθετούνται σε τοπικό buffer.

Ο σταθμός αποθήκευσης αποτελείται από έναν μεταφορικό ιμάντα και έναν διαχωριστή. Ο διαχωριστής μπορεί να διακόψει την παροχή προϊόντων προς το σταθμό επεξεργασίας. Ο σταθμός επεξεργασίας αποτελείται από ένα κινούμενο τραπέζι με έξι θέσεις: είσοδο, δοκιμή, τρύπημα, έξοδος και δύο εφεδρικές θέσεις. Ο προσανατολισμός του προϊόντος ελέγχεται στη θέση δοκιμής, μετά τον οποίο τα προϊόντα (εικονικά) υποβάλλονται σε μηχανική επεξεργασία από ένα τρυπάνι και μετακινούνται στο σταθμό διαλογής. Ο σταθμός διαλογής είναι ο τελευταίος σταθμός στη γραμμή παραγωγής. Σκοπός του είναι να αποθηκεύει τα προϊόντα σε ένα από τα τρία buffer, ανάλογα με το χρώμα και το υλικό. Εδώ, ένας μεταφορικός ιμάντας μεταφέρει τα προϊόντα. Δύο πνευματικές πύλες μπορούν να ανοίξουν ή να κλείσουν για να εκτρέψουν τα προϊόντα από τον ιμάντα σε ένα buffer.

Ο επόπτης της γραμμής παραγωγής πρόκειται να εφαρμοστεί σε ένα PLC, το οποίο είναι το βιομηχανικό πρότυπο για την εφαρμογή εποπτικών ελεγκτών. Εδώ, ένα PLC, συνδεδεμένο μέσω Ethernet σε έξι απομακρυσμένα I/Os, χρησιμοποιείται για την εκτέλεση του κώδικα PLC.

Λόγω του μεγάλου αριθμού εξαρτημάτων, συσκευών και απαιτήσεων στη γραμμή παραγωγής, τα μοντέλα όλων των σταθμών δεν περιλαμβάνονται στην παρούσα εργασία εκτός από το μοντέλο του σταθμού παραγωγής. Ο σταθμός επεξεργασίας απεικονίζεται στο Σήμα 2.



Σχήμα 2: Σταθμός παραγωγής (www.fest.com)

Ο σταθμός παραγωγής αποτελείται από ένα στρογγυλό κινούμενο τραπέζι στο οποίο φορτώνονται τα προϊόντα. Από την είσοδο πρώτα μεταφέρονται στον ελεγκτή (tester), ο οποίος ελέγχει τον προσανατολισμό του προϊόντος. Στη συνέχεια, μεταφέρονται στη μονάδα διάνοιξης οπών (τρυπάνι), όπου ένα προϊόν συσφίγγεται πρώτα πριν το τρυπάνι αρχίσει να κατεργάζεται το προϊόν. Στην έξοδο, ένας προωθητής αφαιρεί τα προϊόντα. Το στρογγυλό κινούμενο τραπέζι έχει δύο εφεδρικές θέσεις που δεν χρησιμοποιούνται.

Η μοντελοποίηση των εξαρτημάτων βασίζεται στις εισόδους και εξόδους της μονάδας ελέγχου. Αυτό το επίπεδο λεπτομέρειας επιλέγεται, έτσι ώστε οι συντιθέμενοι επόπτες να μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας στη μονάδα ελέγχου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μοντέλα

εξαρτημάτων για όλους τους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές των σταθμών. Στη συνέχεια τα μαθηματικά μοντέλα των ενεργοποιητών και των αισθητήρων θα παρουσιαστούν.

2.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το μαθηματικό μοντέλο των ενεργοποιητών του συστήματος επεξεργασίας στη μορφή 6-άδας είναι

$$\mathbf{G}_{A,i} = (\mathbb{Q}_{A,i}, \mathbb{E}_{A,i}, f_{A,i}, \mathbb{H}_{A,i}, x_{A,i,0}, \mathbb{Q}_{A,i,m})$$

όπου i είναι ο αριθμός του ενεργοποιητή του συστήματος.

Το σύνολο των καταστάσεων του αυτόματου του ενεργοποιητή είναι

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

Η κατάσταση $q_{A,i,1}$ αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου ο ενεργοποιητής είναι ανενεργός και η κατάσταση $q_{A,i,2}$ αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου ο ενεργοποιητής είναι ενεργός.

Το αλφάβητο του αυτόματου του ενεργοποιητή είναι

$$\mathbb{E}_{A,i} = \{e_{A,i,1}, e_{A,i,2}\}$$

Το συμβάν $e_{A,i,1}$ είναι η εντολή στον ενεργοποιητή να ενεργοποιηθεί. Το συμβάν $e_{A,i,2}$ είναι η εντολή στον ενεργοποιητή να απενεργοποιηθεί. Επίσης, ισχύει ότι τα ελέγξιμα συμβάντα είναι $\mathbb{E}_{A,i,c} = \{e_{A,i,1}, e_{A,i,2}\}$ και τα μη ελέγξιμα συμβάντα είναι $\mathbb{E}_{A,i,uc} = \emptyset$.

Οι μεταβάσεις του αυτόματου του ενεργοποιητή είναι

$$f_{A,i}(q_{A,i,1}, e_{A,i,1}) = q_{A,i,2},$$

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

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων του αυτόματου του ενεργοποιητή για κάθε κατάσταση είναι

$$\mathbb{H}_{A,i}(q_{A,i,1}) = \{e_{A,i,1}\},$$

$$\mathbb{H}_{A,i}(q_{A,i,2}) = \{e_{A,i,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου του ενεργοποιητή είναι

$$x_{A,i,0} = q_{A,i,1}.$$

Οι σημαδεμένες καταστάσεις του αυτόματου του ενεργοποιητή είναι

$$\mathbb{Q}_{A,i,m} = \{q_{A,i,1}\}.$$

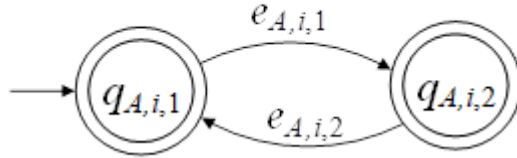
Η κλειστή συμπεριφορά του αυτόματου του ενεργοποιητή είναι

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

Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου του ενεργοποιητή είναι

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

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ενεργοποιητή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ενεργοποιητή

2.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το μαθηματικό μοντέλο των αισθητήρων του συστήματος επεξεργασίας στη μορφή 6-αδας είναι

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

όπου j είναι ο αριθμός του αισθητήρα του συστήματος.

Το σύνολο των καταστάσεων του αυτόματου του αισθητήρα είναι

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

Η κατάσταση $q_{M,j,1}$ αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου ο αισθητήρας είναι ανενεργός και η κατάσταση $q_{M,j,2}$ αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου ο αισθητήρας είναι ενεργός.

Το αλφάβητο του αυτόματου του αισθητήρα είναι

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

Το συμβάν $e_{M,j,1}$ είναι το σήμα ενεργοποίησης του αισθητήρα. Το συμβάν $e_{M,j,2}$ είναι το σήμα απενεργοποίησης του αισθητήρα. Επίσης, ισχύει ότι τα ελέγξιμα συμβάντα είναι $\mathbb{E}_{M,j,c} = \emptyset$ και τα μη ελέγξιμα συμβάντα είναι $\mathbb{E}_{M,j,uc} = \{e_{M,j,1}, e_{M,j,2}\}.$

Οι μεταβάσεις του αυτόματου του αισθητήρα είναι

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

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

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων του αυτόματου του αισθητήρα για κάθε κατάσταση είναι

$$\mathbb{H}_{M,j}(q_{M,j,1}) = \{e_{M,j,1}\},$$

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

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου του αισθητήρα είναι

$$x_{M,j,0} = q_{M,j,1}.$$

Οι σημαδεμένες καταστάσεις του αυτόματου του αισθητήρα είναι

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

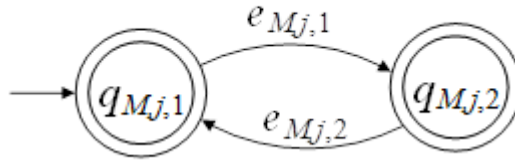
Η κλειστή συμπεριφορά του αυτόματου του αισθητήρα είναι

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

Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου του αισθητήρα είναι

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

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του αισθητήρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του αισθητήρα

2.4 ΤΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το μαθηματικό μοντέλο όλων των συσκευών και εξαρτημάτων βασίζεται στις εισόδους και εξόδους της μονάδας ελέγχου. Επομένως, επόπτες βασιζόμενοι σε αυτό το επίπεδο ανάλυσης μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας στη μονάδα ελέγχου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή μαθηματικών μοντέλων για τα εξαρτήματα (ενεργοποιητές και αισθητήρες) για όλους τους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές των σταθμών. Σε ό,τι αφορά τον σταθμό επεξεργασίας, επτά ενεργοποιητές ελέγχονται από τον ελεγκτή του συστήματος. Το περιστρεφόμενο τραπέζι μπορεί να με κατάλληλη εντολή να περιστραφεί δεξιόστροφα. Ο τεστερ μπορεί να ενεργοποιηθεί με κατάλληλη εντολή. Το τρυπάνι μπορεί να ενεργοποιηθεί με κατάλληλη εντολή. Ο σφιγκτήρας μπορεί να ενεργοποιηθεί με κατάλληλη εντολή. Τέλος ο προωθητής μπορεί να ενεργοποιηθεί με κατάλληλη εντολή. Για το περιστρεφόμενο τραπέζι, ο τρόπος κατασκευής και λειτουργίας (low level control) το εμποδίζει να σταματήσει σε μη προσχεδιασμένη θέση. Ως εκ τούτου, ο ενεργοποιητής στέλνει μόνο έναν σύντομο παλμό για να ξεκινήσει η κίνηση. Για την κίνηση του τρυπανιού χρησιμοποιούνται δύο ενεργοποιητές, ένας για την ανύψωση και ένας για την κάθοδο. Όλοι αυτοί οι ενεργοποιητές μπορούν να μοντελοποιηθούν με τον ίδιο τρόπο όπως τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στην Υποενότητα 2.2.

Για τις μετρήσεις των διαφόρων συσκευών, τέσσερις αισθητήρες μετρούν την παρουσία ενός προϊόντος ένας στη θέση εισόδου, ένας στη θέση δοκιμής, ένας στη θέση τρυπήματος και ένας στη θέση εξόδου. Ακόμα, υπάρχει ένας αισθητήρας που μετρά εάν το περιστρεφόμενο

τραπέζι βρίσκεται στη σωστή θέση απενεργοποίησης (θέση όταν είναι ακίνητο). Δύο αισθητήρες μετρούν τις κατακόρυφες ακραίες θέσεις του τρυπανιού. Επίσης, ένας άλλος αισθητήρας υποδεικνύει εάν ένα προϊόν είναι συσφιγμένο στην αντίστοιχη θέση. Ο τέσσερ είναι εξοπλισμένος με έναν αισθητήρα που ελέγχει εάν οι διαστάσεις του προϊόντος είναι σωστές. Τέλος, ένας εσωτερικός αισθητήρας υποδεικνύει εάν ο σταθμός έχει αρχικοποιηθεί. Όλοι αυτοί οι αισθητήρες, εκτός από τους αισθητήρες θέσης τρυπανιού, μοντελοποιούνται ως ένας απλός αισθητήρας που είναι είτε ενεργοποιημένος είτε απενεργοποιημένος, σύμφωνα με τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στην Υποενότητα 2.2.

Σε ότι αφορά τους αισθητήρες θέσης τρυπανιού το μαθηματικό μοντέλο είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_{M,9} = (\mathbb{Q}_{M,9}, \mathbb{E}_{M,9}, f_{M,9}, \mathbb{H}_{M,9}, x_{M,9,0}, \mathbb{Q}_{M,9,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του αυτόματου του αισθητήρα είναι

$$\mathbb{Q}_{M,9} = \{q_{M,9,1}, q_{M,9,2}, q_{M,9,3}\}.$$

Η κατάσταση $q_{M,9,1}$ αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου το τρυπάνι είναι στην επάνω θέση, $q_{M,9,2}$ αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου το τρυπάνι είναι στο μέσο της διαδρομής, και η κατάσταση $q_{M,9,3}$ αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου το τρυπάνι είναι στην κάτω θέση.

Το αλφάβητο του αυτόματου του αισθητήρα είναι

$$\mathbb{E}_{M,9} = \{e_{M,9,1}, e_{M,9,2}, e_{M,9,3}, e_{M,9,4}\}$$

Το συμβάν $e_{M,9,1}$ είναι το σήμα ενεργοποίησης ότι το τρυπάνι έφυγε από την επάνω θέση. Το συμβάν $e_{M,9,2}$ είναι το σήμα ενεργοποίησης ότι το τρυπάνι έφτασε στην επάνω θέση. Το συμβάν $e_{M,9,3}$ είναι το σήμα ενεργοποίησης ότι το τρυπάνι έφτασε στην κάτω θέση. Το συμβάν $e_{M,9,4}$ είναι το σήμα ενεργοποίησης ότι το τρυπάνι έφυγε από την κάτω θέση. Επίσης, ισχύει ότι τα ελέγξιμα συμβάντα είναι $\mathbb{E}_{M,9,c} = \emptyset$ και τα μη ελέγξιμα συμβάντα είναι $\mathbb{E}_{M,9,uc} = \{e_{M,9,1}, e_{M,9,2}, e_{M,9,3}, e_{M,9,4}\}.$

Οι μεταβάσεις του αυτόματου των αισθητήρων είναι

$$f_{M,9}(q_{M,9,1}, e_{M,9,1}) = q_{M,9,2},$$

$$f_{M,9}(q_{M,9,2}, e_{M,9,2}) = q_{M,9,1},$$

$$f_{M,9}(q_{M,9,2}, e_{M,9,3}) = q_{M,9,3},$$

$$f_{M,9}(q_{M,9,3}, e_{M,9,4}) = q_{M,9,2}.$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων του αυτόματου των αισθητήρων για κάθε κατάσταση είναι

$$\mathbb{H}_{M,9}(q_{M,9,1}) = \{e_{M,9,1}\},$$

$$\mathbb{H}_{M,9}(q_{M,9,2}) = \{e_{M,9,2}, e_{M,9,3}\},$$

$$\mathbb{H}_{M,9}(q_{M,9,3}) = \{e_{M,9,4}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου των αισθητήρων είναι

$$x_{M,9,0} = q_{M,9,1}.$$

Οι σημαδεμένες καταστάσεις του αυτόματου των αισθητήρων είναι

$$\mathbb{Q}_{M,9,m} = \{q_{M,9,1}\}.$$

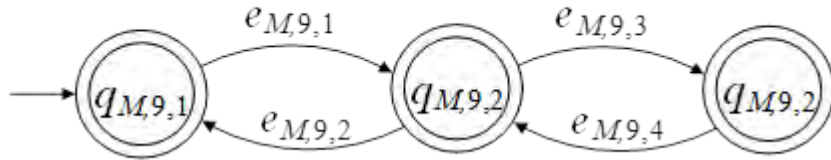
Η κλειστή συμπεριφορά του αυτόματου των αισθητήρων είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_{M,9}) = \overline{(e_{M,9,1}(\varepsilon + e_{M,9,3}e_{M,9,4})e_{M,9,2})^*}.$$

Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου των αισθητήρων είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{M,9}) = (e_{M,9,1}(\varepsilon + e_{M,9,3}e_{M,9,4})e_{M,9,2})^*.$$

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου των αισθητήρων παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του αισθητήρα του τρυπανιού

Σημειώνεται ότι αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει τον φυσικό περιορισμό ότι και οι δύο αισθητήρες δεν μπορούν ποτέ να είναι ενεργοποιημένοι ταυτόχρονα.

Έτσι σε ότι αφορά τους ενεργοποιητές ισχύει ότι

- Ο ενεργοποιητής του περιστρεφόμενου τραπέζιού είναι ο $\mathbf{G}_{A,1}$.
- Ο ενεργοποιητής του τεστερ είναι ο $\mathbf{G}_{A,2}$.
- Ο ενεργοποιητής του τρυπανιού είναι ο $\mathbf{G}_{A,3}$.
- Ο ενεργοποιητής του σφιγκτήρα είναι ο $\mathbf{G}_{A,4}$.
- Ο ενεργοποιητής του προωθητή είναι ο $\mathbf{G}_{A,5}$.
- Ο ενεργοποιητής για την ανύψωση του τρυπανιού είναι ο $\mathbf{G}_{A,6}$.
- Ο ενεργοποιητής για την κάθοδο του τρυπανιού είναι ο $\mathbf{G}_{A,7}$.

Σε ότι αφορά τους αισθητήρες ισχύει ότι

- Ο αισθητήρας της θέσης εισόδου είναι ο $\mathbf{G}_{M,1}$.
- Ο αισθητήρας της θέσης δοκιμής είναι ο $\mathbf{G}_{M,2}$.
- Ο αισθητήρας της θέσης τρυπήματος είναι ο $\mathbf{G}_{M,3}$.
- Ο αισθητήρας της θέσης εξόδου είναι ο $\mathbf{G}_{M,4}$.

- Ο αισθητήρας της θέσης του περιστρεφόμενου τραπέζιου είναι ο $\mathbf{G}_{M,5}$.
- Ο αισθητήρας του σφιγκτήρα είναι ο $\mathbf{G}_{M,6}$.
- Ο αισθητήρας του τεστερ είναι ο $\mathbf{G}_{M,7}$.
- Ο αισθητήρας αρχικοποίησης είναι ο $\mathbf{G}_{M,8}$.
- Ο αισθητήρας των θέσεων του τρυπανιού είναι ο $\mathbf{G}_{M,9}$.

Επομένως το συνολικό αυτόματο του συστήματος είναι της μορφής

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}_{A,1} \parallel \mathbf{G}_{A,2} \parallel \mathbf{G}_{A,3} \parallel \mathbf{G}_{A,4} \parallel \mathbf{G}_{A,5} \parallel \mathbf{G}_{A,6} \parallel \mathbf{G}_{A,7} \parallel \\ \parallel \mathbf{G}_{M,1} \parallel \mathbf{G}_{M,2} \parallel \mathbf{G}_{M,3} \parallel \mathbf{G}_{M,4} \parallel \mathbf{G}_{M,5} \parallel \mathbf{G}_{M,6} \parallel \mathbf{G}_{M,7} \parallel \mathbf{G}_{M,8} \parallel \mathbf{G}_{M,9}$$

Οι καταστάσεις του συνολικού αυτόματου είναι

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_{A,1} \times \mathbf{Q}_{A,2} \times \mathbf{Q}_{A,3} \times \mathbf{Q}_{A,4} \times \mathbf{Q}_{A,5} \times \mathbf{Q}_{A,6} \times \mathbf{Q}_{A,7} \times \\ \times \mathbf{Q}_{M,1} \times \mathbf{Q}_{M,2} \times \mathbf{Q}_{M,3} \times \mathbf{Q}_{M,4} \times \mathbf{Q}_{M,5} \times \mathbf{Q}_{M,6} \times \mathbf{Q}_{M,7} \times \mathbf{Q}_{M,8} \times \mathbf{Q}_{M,9}$$

Το αλφάβητο του συνολικού αυτόματου είναι

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{A,1} \cup \mathbf{E}_{A,2} \cup \mathbf{E}_{A,3} \cup \mathbf{E}_{A,4} \cup \mathbf{E}_{A,5} \cup \mathbf{E}_{A,6} \cup \mathbf{E}_{A,7} \cup \\ \cup \mathbf{E}_{M,1} \cup \mathbf{E}_{M,2} \cup \mathbf{E}_{M,3} \cup \mathbf{E}_{M,4} \cup \mathbf{E}_{M,5} \cup \mathbf{E}_{M,6} \cup \mathbf{E}_{M,7} \cup \mathbf{E}_{M,8} \cup \mathbf{E}_{M,9}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων του συνολικού αυτόματου είναι

$$\mathbf{H}(q) = \mathbf{H}_{A,1}(q_{A,1}) \cup \mathbf{H}_{A,2}(q_{A,2}) \cup \mathbf{H}_{A,3}(q_{A,3}) \cup \mathbf{H}_{A,4}(q_{A,4}) \cup \\ \cup \mathbf{H}_{A,5}(q_{A,5}) \cup \mathbf{H}_{A,6}(q_{A,6}) \cup \mathbf{H}_{A,7}(q_{A,7}) \cup \\ \cup \mathbf{H}_{M,1}(q_{M,1}) \cup \mathbf{H}_{M,2}(q_{M,2}) \cup \mathbf{H}_{M,3}(q_{M,3}) \cup \mathbf{H}_{M,4}(q_{M,4}) \cup \mathbf{H}_{M,5}(q_{M,5}) \cup \\ \cup \mathbf{H}_{M,6}(q_{M,6}) \cup \mathbf{H}_{M,7}(q_{M,7}) \cup \mathbf{H}_{M,8}(q_{M,8}) \cup \mathbf{H}_{M,9}(q_{M,9})$$

Οι σημαδεμένες καταστάσεις του συνολικού αυτόματου είναι

$$\mathbf{Q}_m = \mathbf{Q}_{A,1,m} \times \mathbf{Q}_{A,2,m} \times \mathbf{Q}_{A,3,m} \times \mathbf{Q}_{A,4,m} \times \mathbf{Q}_{A,5,m} \times \mathbf{Q}_{A,6,m} \times \mathbf{Q}_{A,7,m} \times \\ \times \mathbf{Q}_{M,1,m} \times \mathbf{Q}_{M,2,m} \times \mathbf{Q}_{M,3,m} \times \mathbf{Q}_{M,4,m} \times \mathbf{Q}_{M,5,m} \times \mathbf{Q}_{M,6,m} \times \mathbf{Q}_{M,7,m} \times \mathbf{Q}_{M,8,m} \times \mathbf{Q}_{M,9,m}$$

Η αρχική κατάσταση είναι

$$x_0 = (q_{A,1,1}, q_{A,2,1}, q_{A,3,1}, q_{A,4,1}, q_{A,5,1}, q_{A,6,1}, q_{A,7,1}, \\ q_{M,1,1}, q_{M,2,1}, q_{M,3,1}, q_{M,4,1}, q_{M,5,1}, q_{M,6,1}, q_{M,7,1}, q_{M,8,1}, q_{M,9,1})$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

3.1 ΚΑΝΟΝΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Σύμφωνα με την [1], το σύστημα για να λειτουργεί με ασφάλεια και αποδοτικά πρέπει να ακολουθεί κάποιους κανόνες λειτουργίας. Οι κανόνες λειτουργίας είναι οι ακόλουθοι 11 κανόνες:

- 1) Οι ενεργοποιητές μπορούν να ενεργοποιηθούν μόνο αφού έχει αρχικοποιηθεί ο σταθμός.
- 2) Ο περιστρεφόμενος δίσκος μπορεί να περιστραφεί μόνο όταν οι άλλοι ενεργοποιητές βρίσκονται σε ασφαλή θέση, δηλαδή το τρυπάνι στην επάνω θέση, ο σφιγκτήρας έχει αποσυρθεί και ο τέστερ, το τρυπάνι και ο προωθητής είναι απενεργοποιημένοι.
- 3) Ο περιστρεφόμενος δίσκος μπορεί να περιστραφεί μόνο όταν έχει εισαχθεί ένα νέο προϊόν.
- 4) Ο ενεργοποιητής του περιστρεφόμενου δίσκου μπορεί να απενεργοποιηθεί μόνο όταν το περιστρεφόμενο τραπέζι φύγει από την αρχική θέση.
- 5) Ο τέστερ, το τρυπάνι, ο σφιγκτήρας και ο προωθητής επιτρέπεται να ενεργοποιούνται μόνο όταν το περιστρεφόμενο τραπέζι είναι ακίνητο και υπάρχει προϊόν.
- 6) Ο σφιγκτήρας μπορεί να απελευθερωθεί μόνο όταν το τρυπάνι είναι ανυψωμένο και απενεργοποιημένο.
- 7) Το τρυπάνι επιτρέπεται να ενεργοποιηθεί και να κατέβει μόνο όταν υπάρχει συσφιγμένο προϊόν.
- 8) Ο προωθητής μπορεί να ανασυρθεί μόνο αφού αφαιρεθεί το προϊόν.
- 9) Ο ελεγκτής μπορεί να απενεργοποιηθεί μόνο αφού ολοκληρωθεί η μέτρηση.
- 10) Εάν υπάρχει προϊόν στη θέση δοκιμής ή διάτρησης, θα πρέπει να υποβληθεί σε επεξεργασία πριν ενεργοποιηθεί ξανά το περιστρεφόμενο τραπέζι.
- 11) Ο κύκλος στη θέση διάτρησης θα πρέπει να είναι ως εξής: σύσφιξη προϊόντος, ενεργοποίηση τρυπανιού, κάθοδος, ανάβαση, απενεργοποίηση τρυπανιού, απελευθέρωση προϊόντος.

3.2 ΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

Για τον πρώτο κανόνα η επιθυμητή κανονική γλώσσα συμβολίζεται με $\mathbb{K}_{D,1}$ και είναι ίση με την ακόλουθη κανονική έκφραση

$$\mathbb{K}_{D,1} = \overline{\left((e_{A,1,1} + e_{A,2,1} + e_{A,3,1} + e_{A,4,1} + e_{A,5,1})^* e_{M,8,1} e_{M,8,2} \right)^*}.$$

Για τον δεύτερο κανόνα οι επιθυμητές κανονικές γλώσσες συμβολίζονται με $\mathbb{K}_{D,2,1}$, $\mathbb{K}_{D,2,2}$, $\mathbb{K}_{D,2,3}$, $\mathbb{K}_{D,2,4}$, και $\mathbb{K}_{D,2,5}$ και είναι ίση με την ακόλουθη κανονική έκφραση

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

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

$$\mathbb{K}_{D,2,3} = \overline{\left((e_{A,1,1})^* e_{A,5,1} e_{A,5,2} \right)^*},$$

$$\mathbb{K}_{D,2,4} = \overline{\left((e_{A,1,1})^* e_{M,6,1} e_{M,6,2} \right)^*},$$

$$\mathbb{K}_{D,2,5} = \overline{\left((e_{A,1,1})^* e_{M,9,1} e_{M,9,2} \right)^*}.$$

Για τον τρίτο κανόνα η επιθυμητή κανονική γλώσσα συμβολίζεται με $\mathbb{K}_{D,3}$ και είναι ίση με την ακόλουθη κανονική έκφραση

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

Για τον τέταρτο κανόνα η επιθυμητή κανονική γλώσσα συμβολίζεται με $\mathbb{K}_{D,4}$ και είναι ίση με την ακόλουθη κανονική έκφραση

$$\mathbb{K}_{D,4} = \overline{\left(e_{M,5,1} (e_{A,1,2})^* e_{M,5,2} \right)^*}.$$

Για τον πέμπτο κανόνα η επιθυμητή κανονική γλώσσα συμβολίζεται με $\mathbb{K}_{D,5}$ και είναι ίση με την ακόλουθη κανονική έκφραση

$$\mathbb{K}_{D,5} = \overline{\left((e_{A,2,1} + e_{A,3,1} + e_{A,4,1} + e_{A,5,1})^* e_{M,5,1} e_{M,5,2} \right)^*}.$$

Για τον έκτο κανόνα οι επιθυμητές κανονικές γλώσσες συμβολίζονται με $\mathbb{K}_{D,6,1}$, και $\mathbb{K}_{D,6,2}$, και είναι ίση με τις ακόλουθες κανονικές εκφράσεις

$$\mathbb{K}_{D,6,1} = \overline{\left(e_{A,4,2}^* e_{A,3,1} e_{A,3,2} \right)^*},$$

$$\mathbb{K}_{D,6,2} = \overline{\left(e_{A,4,2}^* e_{M,9,1} e_{M,9,2} \right)^*}.$$

Για τον έβδομο κανόνα η επιθυμητή κανονική γλώσσα συμβολίζεται με $\mathbb{K}_{D,7}$ και είναι ίση με την ακόλουθη κανονική έκφραση

$$\mathbb{K}_{D,7} = \overline{\left(e_{M,6,1} (e_{A,3,1} + e_{A,7,1})^* e_{M,6,2} \right)^*}.$$

Για τον όγδοο κανόνα η επιθυμητή κανονική γλώσσα συμβολίζεται με $\mathbb{K}_{D,8}$ και είναι ίση με την ακόλουθη κανονική έκφραση

$$\mathbb{K}_{D,8} = \overline{\left(e_{A,5,1}^* e_{M,4,1} e_{M,4,2} \right)^*}.$$

Για τον ένατο κανόνα η επιθυμητή κανονική γλώσσα συμβολίζεται με $\mathbb{K}_{D,9}$ και είναι ίση με την ακόλουθη κανονική έκφραση

$$\mathbb{K}_{D,9} = \overline{\left(e_{A,2,2}^* e_{M,7,1} e_{M,7,2} \right)^*}.$$

Για τον δέκατο κανόνα οι επιθυμητές κανονικές γλώσσες συμβολίζονται με $\mathbb{K}_{D,10,1}$, και $\mathbb{K}_{D,10,2}$, και είναι ίση με τις ακόλουθες κανονικές εκφράσεις

$$\mathbb{K}_{D,10,1} = \overline{(e_{A,1,1}^* e_{M,2,1} e_{M,2,2})^*},$$

$$\mathbb{K}_{D,10,2} = \overline{(e_{A,1,1}^* e_{M,3,1} e_{M,3,2})^*}.$$

Για τον εντέκατο κανόνα η επιθυμητή κανονική γλώσσα συμβολίζεται με $\mathbb{K}_{D,11}$ και είναι ίση με την ακόλουθη κανονική έκφραση

$$\mathbb{K}_{D,11} = \overline{(e_{A,4,1} e_{A,3,1} e_{A,7,1} e_{A,6,1} e_{A,3,2} e_{A,4,2})^*}.$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

4.1 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,1}$

Το αυτόματο του επόπτη για τη γλώσσα $\mathbb{K}_{D,1}$ είναι της μορφής

$$\mathbf{S}_1 = (\mathbb{Q}_{S,1}, \mathbb{E}_{S,1}, f_{S,1}, \mathbb{H}_{S,1}, x_{S,1,0}, \mathbb{Q}_{S,1})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

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

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,1} = \{e_{A,1,1}, e_{A,2,1}, e_{A,3,1}, e_{A,4,1}, e_{A,5,1}, e_{A,8,1}, e_{A,8,2}\}.$$

Οι μεταβάσεις του επόπτη είναι

$$f_{S,1}(q_{S,1,1}, e) = q_{S,1,1}; e \in \{e_{A,1,1}, e_{A,2,1}, e_{A,3,1}, e_{A,4,1}, e_{A,5,1}\},$$

$$f_{S,1}(q_{S,1,1}, e_{A,8,1}) = q_{S,1,2},$$

$$f_{S,1}(q_{S,1,2}, e_{A,8,2}) = q_{S,1,1}.$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

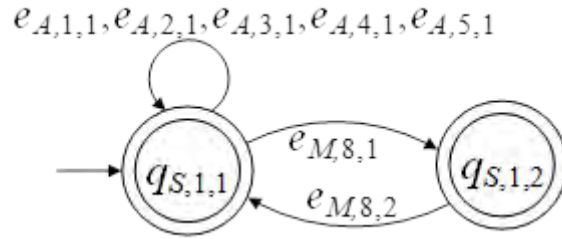
$$\mathbb{H}(q_{S,1,1}) = \{e_{A,1,1}, e_{A,2,1}, e_{A,3,1}, e_{A,4,1}, e_{A,5,1}, e_{A,8,1}\},$$

$$\mathbb{H}(q_{S,1,2}) = \{e_{A,8,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι

$$x_{S,1,0} = q_{S,1,1}.$$

Το διάγραμμα κατάσταση του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Επόπτης \mathbf{S}_1

Η κλειστή και η σημαδεμένη συμπεριφορά του επόπτη είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{S}_1) = \mathbb{L}_m(\mathbf{S}_1) = \overline{\left((e_{A,1,1} + e_{A,2,1} + e_{A,3,1} + e_{A,4,1} + e_{A,5,1})^* e_{M,8,1} e_{M,8,2} \right)^*}.$$

4.2 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,2,1}$

Το αυτόματο του επόπτη για τη γλώσσα $\mathbb{K}_{D,2,1}$ είναι της μορφής

$$\mathbf{S}_2 = (\mathbb{Q}_{S,2}, \mathbb{E}_{S,2}, f_{S,2}, \mathbb{H}_{S,2}, x_{S,2,0}, \mathbb{Q}_{S,2})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

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

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

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

Οι μεταβάσεις του επόπτη είναι

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

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

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

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

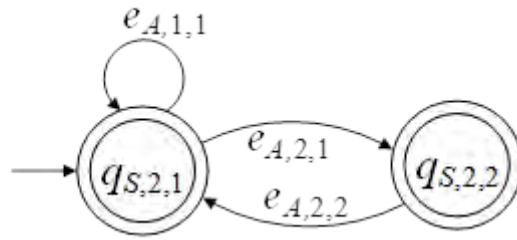
$$\mathbb{H}(q_{S,2,1}) = \{e_{A,1,1}, e_{A,2,1}\},$$

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

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι

$$x_{S,2,0} = q_{S,2,1}.$$

Το διάγραμμα κατάσταση του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Επόπτης S_2

Η κλειστή και η σημαδεμένη συμπεριφορά του επόπτη είναι

$$\mathbb{L}(S_2) = \mathbb{L}_m(S_2) = \overline{(e_{A,1,1})^* e_{A,2,1} e_{A,2,2}}^*.$$

4.3 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,3}$

Το αυτόματο του επόπτη για τη γλώσσα $\mathbb{K}_{D,3}$ είναι της μορφής

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

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$Q_{S,3} = \{q_{S,3,1}, q_{S,3,2}\}.$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,3} = \{e_{M,1,1}, e_{M,1,2}, e_{A,1,1}\}.$$

Οι μεταβάσεις του επόπτη είναι

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

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

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

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

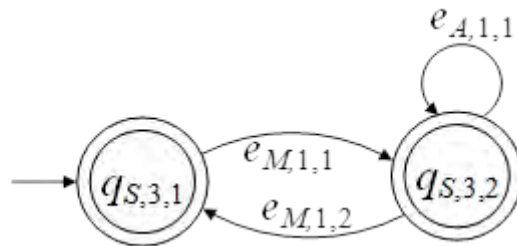
$$\mathbb{H}(q_{S,3,1}) = \{e_{M,1,1}\},$$

$$\mathbb{H}(q_{S,3,2}) = \{e_{A,1,1}, e_{M,1,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι

$$x_{S,3,0} = q_{S,3,1}.$$

Το διάγραμμα κατάσταση του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Επόπτης S_3

Η κλειστή και η σημαδεμένη συμπεριφορά του επόπτη είναι

$$\mathbb{L}(S_3) = \mathbb{L}_m(S_3) = \overline{(e_{M,1,1}(e_{A,1,1})^* e_{M,1,2})^*}.$$

4.4 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,4}$

Το αυτόματο του επόπτη για τη γλώσσα $\mathbb{K}_{D,4}$ είναι της μορφής

$$S_4 = (Q_{S,4}, \mathbb{E}_{S,4}, f_{S,4}, \mathbb{H}_{S,4}, x_{S,4,0}, Q_{S,4})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$\mathbb{Q}_{S,4} = \{q_{S,4,1}, q_{S,4,2}\}.$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,4} = \{e_{M,5,1}, e_{A,1,2}, e_{M,5,2}\}.$$

Οι μεταβάσεις του επόπτη είναι

$$f_{S,4}(q_{S,4,1}, e_{M,5,1}) = q_{S,4,2},$$

$$f_{S,4}(q_{S,4,2}, e_{A,1,2}) = q_{S,4,2},$$

$$f_{S,4}(q_{S,4,2}, e_{M,5,2}) = q_{S,4,1}.$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

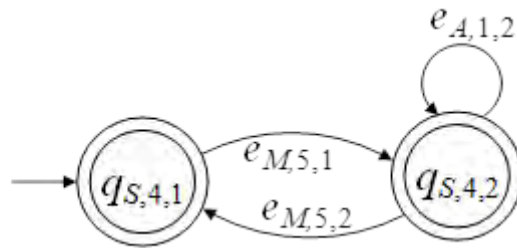
$$\mathbb{H}(q_{S,4,1}) = \{e_{M,5,1}\},$$

$$\mathbb{H}(q_{S,4,2}) = \{e_{A,1,2}, e_{M,5,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι

$$x_{S,4,0} = q_{S,4,1}.$$

Το διάγραμμα κατάσταση του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Επόπτης S_4

Η κλειστή και η σημαδεμένη συμπεριφορά του επόπτη είναι

$$\mathbb{L}(S_4) = \mathbb{L}_m(S_4) = \overline{(e_{M,5,1}(e_{A,1,2})^* e_{M,5,2})^*}.$$

4.5 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,5}$

Το αυτόματο του επόπτη για τη γλώσσα $\mathbb{K}_{D,5}$ είναι της μορφής

$$\mathbf{S}_5 = (\mathbb{Q}_{S,5}, \mathbb{E}_{S,5}, f_{S,5}, \mathbb{H}_{S,5}, x_{S,5,0}, \mathbb{Q}_{S,5})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$\mathbb{Q}_{S,5} = \{q_{S,5,1}, q_{S,5,2}\}.$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,5} = \{e_{A,2,1}, e_{A,3,1}, e_{A,4,1}, e_{A,5,1}, e_{M,5,1}, e_{M,5,2}\}.$$

Οι μεταβάσεις του επόπτη είναι

$$f_{S,5}(q_{S,5,1}, e) = q_{S,5,1}; e \in \{e_{A,2,1}, e_{A,3,1}, e_{A,4,1}, e_{A,5,1}\},$$

$$f_{S,5}(q_{S,5,1}, e_{M,5,1}) = q_{M,5,2},$$

$$f_{S,5}(q_{S,5,2}, e_{M,5,2}) = q_{S,5,1}.$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

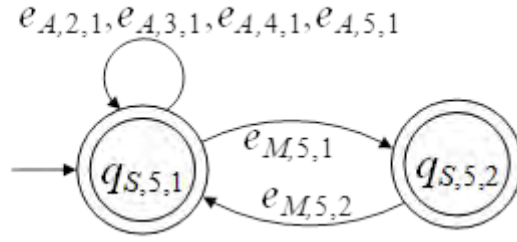
$$\mathbb{H}(q_{S,5,1}) = \{e_{A,2,1}, e_{A,3,1}, e_{A,4,1}, e_{A,5,1}, e_{M,5,1}\},$$

$$\mathbb{H}(q_{S,5,2}) = \{e_{M,5,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι

$$x_{S,5,0} = q_{S,5,1}.$$

Το διάγραμμα κατάσταση του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10: Επόπτης S_5

Η κλειστή και η σημαδεμένη συμπεριφορά του επόπτη είναι

$$\mathbb{L}(S_5) = \mathbb{L}_m(S_5) = \overline{\left((e_{A,2,1} + e_{A,3,1} + e_{A,4,1} + e_{A,5,1})^* e_{S,5,1} e_{S,5,2} \right)^*}.$$

4.6 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,6,1}$

Το αυτόματο του επόπτη για τη γλώσσα $\mathbb{K}_{D,6,1}$ είναι της μορφής

$$S_6 = (Q_{S,6}, \mathbb{E}_{S,6}, f_{S,6}, \mathbb{H}_{S,6}, x_{S,6,0}, Q_{S,6})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$Q_{S,6} = \{q_{S,6,1}, q_{S,6,2}\}.$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,6} = \{e_{A,4,2}, e_{A,3,1}, e_{A,3,2}\}.$$

Οι μεταβάσεις του επόπτη είναι

$$f_{S,6}(q_{S,6,1}, e_{A,4,2}) = q_{S,6,1},$$

$$f_{S,6}(q_{S,6,1}, e_{A,3,1}) = q_{S,6,2},$$

$$f_{S,6}(q_{S,6,2}, e_{A,3,2}) = q_{S,6,1}.$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

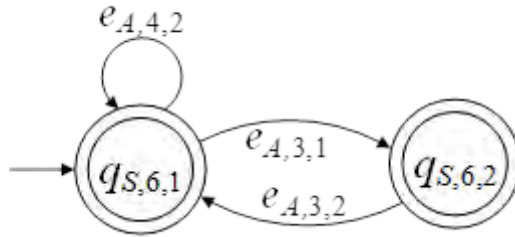
$$\mathbb{H}(q_{S,6,1}) = \{e_{A,4,2}, e_{A,3,1}\},$$

$$\mathbb{H}(q_{S,6,2}) = \{e_{A,3,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι

$$x_{S,6,0} = q_{S,6,1}.$$

Το διάγραμμα κατάσταση του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11: Επόπτης S_6

Η κλειστή και η σημαδεμένη συμπεριφορά του επόπτη είναι

$$\mathbb{L}(S_6) = \mathbb{L}_m(S_6) = \overline{(e_{A,4,2}^* e_{A,3,1} e_{A,3,2})^*}.$$

4.7 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,7}$

Το αυτόματο του επόπτη για τη γλώσσα $\mathbb{K}_{D,7}$ είναι της μορφής

$$S_7 = (Q_{S,7}, \mathbb{E}_{S,7}, f_{S,7}, \mathbb{H}_{S,7}, x_{S,7,0}, Q_{S,7})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$Q_{S,7} = \{q_{S,7,1}, q_{S,7,2}\}.$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,7} = \{e_{A,3,1}, e_{A,7,1}, e_{M,6,1}, e_{M,6,2}\}.$$

Οι μεταβάσεις του επόπτη είναι

$$\begin{aligned}
f_{S,7}(q_{S,7,1}, e_{M,6,1}) &= q_{S,7,1}, \\
f_{S,7}(q_{S,7,2}, e_{A,3,1}) &= q_{S,7,2}, \\
f_{S,7}(q_{S,7,2}, e_{A,7,1}) &= q_{S,7,2}, \\
f_{S,7}(q_{S,7,2}, e_{M,6,2}) &= q_{S,7,1}.
\end{aligned}$$

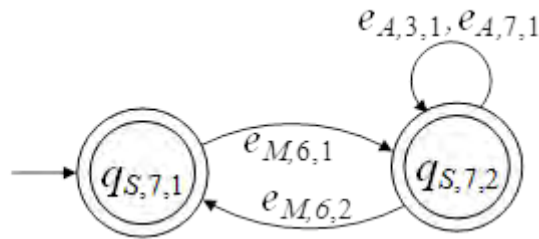
Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

$$\begin{aligned}
\mathbb{H}(q_{S,7,1}) &= \{e_{M,6,1}\}, \\
\mathbb{H}(q_{S,7,2}) &= \{e_{A,3,1}, e_{A,7,1}, e_{M,6,2}\}.
\end{aligned}$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι

$$x_{S,7,0} = q_{S,7,1}.$$

Το διάγραμμα κατάσταση του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12: Επόπτης S_7

Η κλειστή και η σημαδεμένη συμπεριφορά του επόπτη είναι

$$\mathbb{L}(S_7) = \mathbb{L}_m(S_7) = \overline{(e_{M,6,1}(e_{A,3,1} + e_{A,7,1})^* e_{M,6,2})^*}.$$

4.8 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,8}$

Το αυτόματο του επόπτη για τη γλώσσα $\mathbb{K}_{D,8}$ είναι της μορφής

$$S_8 = (Q_{S,8}, E_{S,8}, f_{S,8}, \mathbb{H}_{S,8}, x_{S,8,0}, Q_{S,8})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$\mathbb{Q}_{S,8} = \{q_{S,8,1}, q_{S,8,2}\}.$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,8} = \{e_{A,5,1}, e_{M,4,1}, e_{M,4,2}\}.$$

Οι μεταβάσεις του επόπτη είναι

$$f_{S,8}(q_{S,8,1}, e_{A,5,1}) = q_{S,8,1},$$

$$f_{S,8}(q_{S,8,1}, e_{M,4,1}) = q_{S,8,2},$$

$$f_{S,8}(q_{S,8,2}, e_{M,4,2}) = q_{S,8,1}.$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

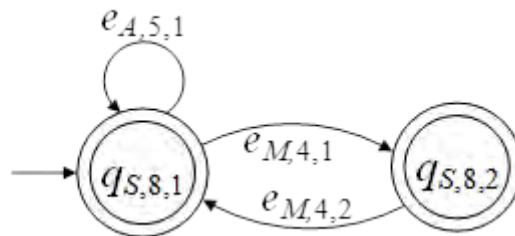
$$\mathbb{H}(q_{S,8,1}) = \{e_{A,5,1}, e_{M,4,1}\},$$

$$\mathbb{H}(q_{S,8,2}) = \{e_{M,4,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι

$$x_{S,8,0} = q_{S,8,1}.$$

Το διάγραμμα κατάσταση του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 13.



Σχήμα 13: Επόπτης S_8

Η κλειστή και η σημαδεμένη συμπεριφορά του επόπτη είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{S}_8) = \mathbb{L}_m(\mathbf{S}_8) = \overline{(e_{A,5,1}^* e_{M,4,1} e_{M,4,2})^*}.$$

4.9 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,9}$

Το αυτόματο του επόπτη για τη γλώσσα $\mathbb{K}_{D,8}$ είναι της μορφής

$$\mathbf{S}_9 = (\mathbb{Q}_{S,9}, \mathbb{E}_{S,9}, f_{S,9}, \mathbb{H}_{S,9}, x_{S,9,0}, \mathbb{Q}_{S,9})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$\mathbb{Q}_{S,9} = \{q_{S,9,1}, q_{S,9,2}\}.$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,9} = \{e_{A,2,2}, e_{M,7,1}, e_{M,7,2}\}.$$

Οι μεταβάσεις του επόπτη είναι

$$f_{S,9}(q_{S,9,1}, e_{A,2,2}) = q_{S,9,1},$$

$$f_{S,9}(q_{S,9,1}, e_{M,7,1}) = q_{S,9,2},$$

$$f_{S,9}(q_{S,9,2}, e_{M,7,2}) = q_{S,9,1}.$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

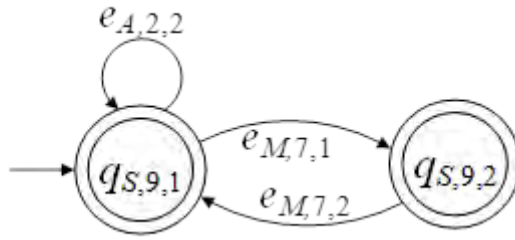
$$\mathbb{H}(q_{S,9,1}) = \{e_{A,2,2}, e_{M,7,1}\},$$

$$\mathbb{H}(q_{S,9,2}) = \{e_{M,7,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι

$$x_{S,9,0} = q_{S,9,1}.$$

Το διάγραμμα κατάσταση του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 14.



Σχήμα 14: Επόπτης \mathbf{S}_9

Η κλειστή και η σημαδεμένη συμπεριφορά του επόπτη είναι

$$\mathbf{L}(\mathbf{S}_9) = \mathbf{L}_m(\mathbf{S}_9) = \overline{(e_{A,2,2}^* e_{M,7,1} e_{M,7,2})^*}.$$

4.10 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,10,1}$

Το αυτόματο του επόπτη για τη γλώσσα $\mathbb{K}_{D,10,1}$ είναι της μορφής

$$\mathbf{S}_{10} = (\mathbb{Q}_{S,10}, \mathbb{E}_{S,10}, f_{S,10}, \mathbb{H}_{S,10}, x_{S,10,0}, \mathbb{Q}_{S,10})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$\mathbb{Q}_{S,10} = \{q_{S,10,1}, q_{S,10,2}\}.$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,10} = \{e_{A,1,1}, e_{M,2,1}, e_{M,2,2}\}.$$

Οι μεταβάσεις του επόπτη είναι

$$f_{S,10}(q_{S,10,1}, e_{A,1,1}) = q_{S,10,1},$$

$$f_{S,10}(q_{S,10,1}, e_{M,2,1}) = q_{S,10,2},$$

$$f_{S,10}(q_{S,10,2}, e_{M,2,2}) = q_{S,10,1}.$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

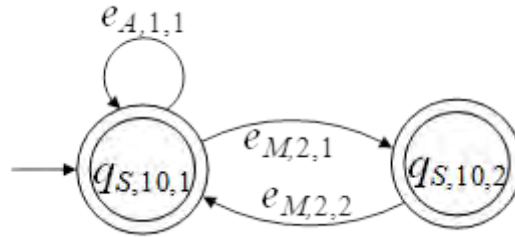
$$\mathbb{H}(q_{S,10,1}) = \{e_{A,1,1}, e_{M,2,1}\},$$

$$\mathbb{H}(q_{S,10,2}) = \{e_{M,2,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι

$$x_{S,10,0} = q_{S,10,1}.$$

Το διάγραμμα κατάσταση του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 15.



Σχήμα 15: Επόπτης S_{10}

Η κλειστή και η σημαδεμένη συμπεριφορά του επόπτη είναι

$$\mathbb{L}(S_{10}) = \mathbb{L}_m(S_{10}) = \overline{(e_{A,1,1}^* e_{M,2,1} e_{M,2,2})^*}.$$

4.11 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,11}$

Το αυτόματο του επόπτη για τη γλώσσα $\mathbb{K}_{D,11}$ είναι της μορφής

$$S_{11} = (Q_{S,11}, \mathbb{E}_{S,11}, f_{S,11}, \mathbb{H}_{S,11}, x_{S,11,0}, Q_{S,11})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$Q_{S,10} = \{q_{S,10,1}, q_{S,10,2}, q_{S,10,3}, q_{S,10,4}, q_{S,10,5}, q_{S,10,6}\}.$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,11} = \{e_{A,4,1}, e_{A,4,2}, e_{A,3,1}, e_{A,3,2}, e_{A,7,1}, e_{A,6,1}\}.$$

Οι μεταβάσεις του επόπτη είναι

$$\begin{aligned}
f_{S,11}(q_{S,11,1}, e_{A,4,1}) &= q_{S,11,2}, \\
f_{S,11}(q_{S,11,2}, e_{A,3,1}) &= q_{S,11,3}, \\
f_{S,11}(q_{S,11,3}, e_{A,7,1}) &= q_{S,11,4}, \\
f_{S,11}(q_{S,11,4}, e_{A,6,1}) &= q_{S,11,5}, \\
f_{S,11}(q_{S,11,5}, e_{A,3,2}) &= q_{S,11,6}, \\
f_{S,11}(q_{S,11,6}, e_{A,4,2}) &= q_{S,11,1}.
\end{aligned}$$

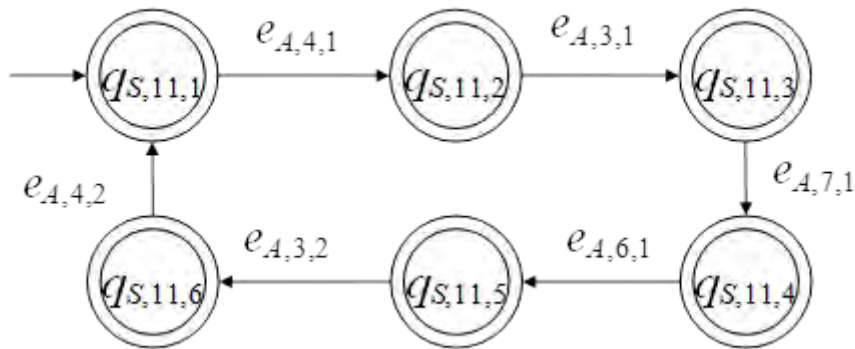
Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων είναι

$$\begin{aligned}
\mathbb{H}(q_{S,11,1}) &= \{e_{A,4,1}\}, \\
\mathbb{H}(q_{S,11,2}) &= \{e_{A,3,1}\}, \\
\mathbb{H}(q_{S,11,3}) &= \{e_{A,7,1}\}, \\
\mathbb{H}(q_{S,11,4}) &= \{e_{A,6,1}\}, \\
\mathbb{H}(q_{S,11,5}) &= \{e_{A,3,2}\}, \\
\mathbb{H}(q_{S,11,6}) &= \{e_{A,4,2}\}.
\end{aligned}$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι

$$x_{S,11,0} = q_{S,11,1}.$$

Το διάγραμμα κατάσταση του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 16.



Σχήμα 16: Επόπτης S_{11}

Η κλειστή και η σημαδεμένη συμπεριφορά του επόπτη είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{S}_{11}) = \mathbb{L}_m(\mathbf{S}_{11}) = \overline{(e_{A,4,1}e_{A,3,1}e_{A,7,1}e_{A,6,1}e_{A,3,2}e_{A,4,2})^*}.$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε το μαθηματικό μοντέλο ενός σταθμού κατεργασίας της Festo Didactic το οποίο αποτελείται από ένα περιστροφικό τραπέζι (turntable), μία συσκευή ελέγχου (tester), μία συσκευή διάτρησης (drill), έναν σφιγκτήρα (clamp) και μία συσκευή προώθησης των προϊόντων (ejector). Παρουσιάστηκαν τα μαθηματικά μοντέλα των υποσυστημάτων του συστήματος. Αναπτύχθηκε το συνολικό μοντέλο του συστήματος. Παρουσιάστηκαν όλες οι προδιαγραφές λειτουργίας, ασφαλείας και συντονισμού των υποσυστημάτων. Παρουσιάστηκαν οι επιθυμητές συμπεριφορές σε μορφή επιθυμητών κανονικών γλωσσών. Διερευνηθηκαν οι ιδιότητες των επιθυμητών γλωσσών ως προς το συνολικό αυτόματο του συστήματος. Διερευνήθηκε η δυνατότητα αναλυτικού σχεδιασμού μιας δομοστοιχειωτής αρχιτεκτονικής εποπτικού ελέγχου που αποφεύγει τον εγκλωβισμό.

REFERENCES

1. 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 Transactions on Control Systems Technology*, vol. 25(1), pp. 175-191, 2017.
2. F. F. H. Reijnen, M. A. Goorden, J. M. van de Mortel-Fronczak, M. A. Reniers and J. E. Rooda, "Application of Dependency Structure Matrices and Multilevel Synthesis to a Production Line," *2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, Copenhagen, Denmark, August 21-24, 2018.
3. C. G. Casandras and S. LaFortune, *Introduction to Discrete Event Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1999.
4. W. M. Wonham and C. Kai, *Supervisory control of discrete-event systems*, Springer International Publishing, 2019.
5. 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.
6. 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.
7. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, M. P. Tzamtzi, and D. Papadopoulos, "Supervisory Control of Multiple Product Flow for a Flexible Manufacturing System," *Advances in Computational Mechanics and Applications, OES 2023*, vol 29. Springer, Cham, 2023.
8. 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.
9. B. Alkan, D. Vera, B. Ahmad, and R. Harrison, "A Method to Assess Assembly Complexity of Industrial Products in Early Design Phase," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 989-999, 2018.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. R. Szpak, M. H. de Queiroz, and J. E. R. Cury, "Synthesis and implementation of supervisory control for manufacturing systems under processing uncertainties and time constraints," *IFAC PaperOnLine*, vol. 53, pp. 229-234, 2020.

15. H. Tang, D. Li, S. Wang, and Z. Dong, "CASOA: An Architecture for Agent-Based Manufacturing System in the Context of Industry 4.0," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 12746-12754, 2018.
16. 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.
17. X. Wang, J. Berberich, J. Sun, G. Wang, F. Allgöwer and J. Chen, "Model-Based and Data-Driven Control of Event- and Self-Triggered Discrete-Time Linear Systems," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 53, no. 9, pp. 6066-6079, 2023.
18. T. Ohtsuka, C. Kai, and K. Kenji, "Data-Informativity for Data-Driven Supervisory Control of Discrete-Event Systems," *2023 62nd IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 6923-6928, 2023.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. J. Komenda, and T. Masopust, "Hierarchical Supervisory Control Under Partial Observation: Normality," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 68, pp. 7286–7298, 2023.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. R. Su, J. H. van Schuppen, and J. E. Rooda, "Aggregative Synthesis of Distributed Supervisors Based on Automaton Abstraction," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 55(7), pp. 1627-1640, 2010.
28. 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.

29. R. Su, J. H. van Schuppen, and J. E. Rooda, "The Synthesis of Time Optimal Supervisors by Using Heaps-of-Pieces," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 57(1), pp. 105-118, 2012.
30. R. Su, "Coordinated distributed time optimal supervisory control," *Proc. of the American Control Conference (ACC)*, pp. 905-910, 2013.
31. K. Cai, and W. M. Wonham, "New results on supervisor localization, with case studies," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 25, pp. 203–226, 2015.
32. J. Komenda, T. Masopust, and J. H. van Schuppen, "Synthesis of controllable and normal sublanguages for discrete-even systems using a coordinator," *Syst. Control Lett.*, vol. 60, pp. 492–502, 2011.
33. 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-CECNSM)*, Kastoria, Greece, pp. 1-6, 2017.
34. 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.
35. J. Komenda and T. Masopust, "Hierarchical Supervisory Control Under Partial Observation: Normality," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 68(12), pp. 7286-7298, 2023.
36. P. Tabuada and G. J. Pappas, "Linear time logic control of discrete time linear systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 51(12), pp. 1862–1877, 2006.
37. F. Göbe, O. Ney, and S. Kowalewski, "Reusability and modularity of safety specifications for supervisory control," *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pp. 1-8, 2016.
38. A. Nejati, A. Lavaei, P. Jagtap, S. Soudjani and M. Zamani, "Formal Verification of Unknown Discrete- and Continuous-Time Systems: A Data-Driven Approach," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 68(5), pp. 3011-3024, 2023.
39. 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.
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. 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.
42. N. D. Kouvakas, F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, M. P. Tzamtzi, G. E. Panagiotakis, and A. Tsatsanias, "A Reconfigurable Supervisory Control Algorithm for the Parametric Model of Multi-elevator Systems in Mines," *Frontiers of Artificial Intelligence, Ethics, and Multidisciplinary Applications (FAIEMA 2023)*, Springer, Singapore, 2023.
43. W. A. F. Scotti, N. B. Portilla, M. H. de Queiroz, J. E. R. Cury, "Modular and systematic design of supervisory control system integrating PLC, SCADA and task routing for a

- modular production system,” *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Gothenburg, Sweden, 24-28 August, 2015.
44. M. V. S. Alves, L. K. Carvalho, and J. C. Basilio, “Supervisory Control of Networked Discrete Event Systems With Timing Structure,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 66(5), pp. 2206-2218, 2021.
 45. M. D. Prieto, Á. F. Sobrino, L. R. Soto, D. Romero, P. F. Biosca and L. R. Martínez, "Active Learning based Laboratory towards Engineering Education 4.0," *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Zaragoza, Spain, pp. 776-783, 2019.
 46. M. S. Thomas, P. Kumar and V. K. Chandna, "Design, development, and commissioning of a supervisory control and data acquisition (SCADA) laboratory for research and training," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1582-1588, 2004.
 47. M. Kermani, B. Adelmanesh, E. Shirdare, C. Alexandra Sima, D. L. Carnì, and L. Martirano, “Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid for smart building applications,” *Renewable Energy*, vol. 171, pp. 1115-1127, 2021.
 48. R. Oueslati, O. Mosbahi, M. Khalgui, Z. Li and T. Qu, “Combining Semi-Formal and Formal Methods for the Development of Distributed Reconfigurable Control Systems,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 70426-70443, 2018
 49. J. Zhang and W. M. Wonham, “Bidirectional Dynamic Reconfiguration of Discrete-Event Systems,” *2020 American Control Conference (ACC)*, pp. 3659-3664, 2020.
 50. M. Khalgui and K. Thramboulidis, “An IEC61499-based development approach for distributed industrial control applications,” *International Journal of Modelling, Identification and Control*, Vol.4 No.2, 2008.
 51. V. Vyatkin, H. Hanisch, C. Pang and C. Yang, “Closed-Loop Modeling in Future Automation System Engineering and Validation,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 39, no. 1, pp. 17-28, 2009.
 52. K. Thramboulidis and A. Buda, “3+1 SysML view model for IEC61499 Function Block control systems,” *2010 8th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pp. 175-180, 2010.
 53. T. Hussain and G. Frey, “Migration of a PLC Controller to an IEC 61499 Compliant Distributed Control System: Hands-on Experiences,” *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3984-3989, 2005.
 54. A. Rashidinejad, M. Reniers and M. Fabian, "Supervisory Control of Discrete-Event Systems in an Asynchronous Setting," *2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Vancouver, BC, Canada, pp. 494-501, 2019.
 55. B. Zhao, F. Lin, C. Wang, X. Zhang, M. P. Polis and L. Y. Wang, "Supervisory Control of Networked Timed Discrete Event Systems and Its Applications to Power Distribution Networks," in *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 146-158, 2017.
 56. S. Shu and F. Lin, "Predictive Networked Control of Discrete Event Systems," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 62, no. 9, pp. 4698-4705, 2017.
 57. N. L. Iacobici, F. Demeter, F. M. Frigura-Iliasa, L. Dolga, H. Filipescu and M. Iorga, "Supervisory Control of Discrete Event Systems in Manufacturing Industry," *2019 2nd*

- International Conference of Intelligent Robotic and Control Engineering (IRCE)*, Singapore, pp. 42-45, 2019.
58. E. Dogaru, F. M. Frigura-Iliasa, M. Iorga, L. Dolga, H. Filipescu and M. Frigura-Iliasa, "PLC Commanded Intelligent Logistics Model Based on Discrete Event Systems," *2019 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)*, Singapore, pp. 159-163, 2019.
59. F. Göbe, S. Aydin and S. Kowalewski, "Applicability of supervisory control theory for the supervision of PLC programs," *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Limassol, Cyprus, p. 1-8, 2017.