

Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής  
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Πληροφορική»

**Μεταπτυχιακή Διατριβή**

Τίτλος Διατριβής	<b>Αρχές λειτουργίας, έλεγχος και εφαρμογές του πρωτοκόλλου CAN</b>
Title	<b>Operating principles, control and applications of CAN protocol</b>
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	<b>Βουτσαδάκης Σταμάτιος</b>
Πατρώνυμο	<b>Παύλος</b>
Αριθμός Μητρώου	<b>ΜΠΠΛ10008</b>
Επιβλέπων Καθηγητής	<b>Δουληγέρης Χρήστος</b>

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

(υπογραφή)

Χρήστος Δουληγέρης  
Καθηγητής

(υπογραφή)

Πολέμη Νινέτα  
Επίκουρος Καθηγήτρια

(υπογραφή)

Παναγιώτης  
Κοτζανικολάου  
Λέκτορας

## Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εξετάζει τις αρχές λειτουργίας που διέπουν τα δίκτυα που επικοινωνούν με το πρωτόκολλο CAN.

Αναλύει τον τρόπο επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων και εξηγεί αρχιτεκτονικές δικτύων.

Αναλύει μια μέθοδο επικοινωνίας του IP πάνω σε δίκτυο CAN καθώς και αξιολογεί κάποια από τα γνωστά δίκτυα ελέγχου.

Τέλος γίνεται αναφορά και στα κατακεκομμένα συστήματα ελέγχου που χωρίς τα δίκτυα CAN δεν θα είχαν γνωρίσει την εξέλιξη που έχουν γνωρίσει μέχρι σήμερα.

## Abstract

This master thesis examines operating principles regarding networks that communicate with the CAN protocol.

Analyzes how communication is established between nodes and explains network architectures.

Analyzes a method of IP communication over the CAN network and evaluate some of the known control networks.

Finally there is a mention in distributed control systems, which without the CAN networks would not have experienced the development that they have experienced so far.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Χρήστο Δουλιγγέρη για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την συμπαράσταση και υποστήριξη τους καθώς και τους συμφοιτητές και φίλους μου Κελεπούρη Χαράλαμπο, Μαθιουδάκη Δημήτριο και Πανταζή Γεώργιο για το πνεύμα συνεργασίας και τη φιλία τους καθ' όλη τη διάρκεια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη διατριβή συντάχθηκε σε Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Ρώμη, Μπρίντζι, Τεργέστη, Ανκόνα, Κάιρο, Ρότερνταμ, Άμστερνταμ, Κωνσταντινούπολη και Τέλ Αβίβ.

Τέλος θα ήθελα να αφιερώσω την μεταπτυχιακή μου διατριβή στην μνήμη του παππού μου.

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	3
Abstract .....	3
1 Εισαγωγή.....	6
1.1 Ιστορία του CAN .....	6
1.2 Ιστορική Αναδρομή CANbus .....	8
2 Χαρακτηριστικά.....	9
2.1 Τυποποίηση.....	9
2.2 Εφαρμογές.....	9
2.3 Υλικό.....	10
2.4 Τεχνολογία .....	11
2.5 Μετάδοση Δεδομένων.....	13
2.6 Κατανομή ID.....	15
2.7 Χρονοδιάγραμμα BIT .....	15
2.8 Επίπεδα .....	16
2.10 Πλαίσια .....	19
2.10.1 Πλαίσιο Δεδομένων .....	20
2.10.2 Βασική Μορφή Πλαισίου .....	20
2.10.3 Εκτεταμένη Μορφή Πλαισίου .....	22
2.10.4 Απομακρυσμένο Πλαίσιο.....	23
2.10.5 Πλαίσιο Σφάλματος .....	24
2.10.6 Πλαίσιο Υπερφόρτωσης.....	24
2.10.7 Διαπλαισιακή Απόσταση.....	24
2.10.8 BIT Γέμισης .....	25
2.11 Πρότυπα .....	25
2.12 Εφαρμογές Υψηλότερων Στρωμάτων .....	26
2.13 Ασφάλεια.....	27
3 Συνεργασία του IP με το CAN.....	28
3.1 Εισαγωγή και περιγραφή του προβλήματος .....	28
3.2 IP πάνω σε CAN .....	29
3.3 Internet Gateway Service (IGS).....	30
3.4 Μετατρέποντας την προσανατολισμένη στη σύνδεση επικοινωνία στην προσανατολισμένη στο μήνυμα επικοινωνία .....	31
4 Εφαρμογές CAN σε οχήματα.....	34
4.1 Το CANbus στην αυτοκινητοβιομηχανία .....	34
4.2 Πρίν απο την καθιέρωση του CANbus .....	34
4.3 Μετά την καθιέρωση του CANbus .....	36
5 Αρχιτεκτονικές .....	39
5.1 Επιβατικό αυτοκίνητο .....	39
5.2 Φορτηγό αυτοκίνητο .....	41
5.3 Πλοiάριο ναυτικού ΗΠΑ .....	44
5.4 Διαστημόπλοιο SMART-1.....	46
5.5 Αεροπλάνο τύπου Boeing .....	49
5.5.1 Πλεονεκτήματα FlexRay .....	51
5.5.2 Μειονεκτήματα FlexRay.....	51
6 Εφαρμογές Ελέγχου .....	53
6.1 Σύστημα δυναμικού ελέγχου οχήματος .....	53
6.2 Σύστημα ελέγχου πλευσης και τροχιάς.....	56
6.3 Σύστημα ελέγχου ειδοποίησης και παρακολούθησης πλοίου (Alarm and Monitoring System) .....	58
6.4 Σύστημα ελέγχου κίνησης πλοίου (Propulsion Control) .....	62
7 Αξιολόγηση Απόδοσης Δικτύων Ελέγχου.....	65

7.1 Δίκτυα Ελέγχου .....	67
7.1.1 Ethernet (CSMA/CD) .....	67
7.1.2 ControlNet (Token Passing Bus).....	70
7.1.3 DeviceNet (CANbus).....	74
8 Κατανεμημένα Συστήματα Ελέγχου .....	76
8.1 Ορισμός.....	76
8.2 Χαρακτηριστικά Κατανεμημένων Συστημάτων Ελέγχου.....	78
8.3 Μεθοδολογίες Σχεδίασης ενός Κατανεμημένου Συστήματος Ελέγχου .....	82
8.4 Αντικειμενοστρεφείς (Object Oriented) .....	82
8.4.1 Unified Modelling Language (UML) .....	82
8.4.2 Rational Unified Process (RUP) .....	82
8.4.3 Ευέλικτη ανάπτυξη .....	82
8.4.4 OMG Model Driven Architecture (MDA).....	83
8.5 Αντικειμενοστρεφείς μεθοδολογίες μοντελοποίησης πραγματικού χρόνου.....	84
8.5.1 ROOM.....	84
8.5.2 OCTOPUS .....	84
8.5.3 ROPES .....	85
8.6 Μεθοδολογίες ανάπτυξης κατανεμημένων συστημάτων ελέγχου .....	85
8.6.1 IEC 61499 .....	85
8.6.2 IDA Architecture Model.....	86
8.6.3 PROFInet Engineering Model .....	86
8.6.4 TORERO.....	86
8.7 Μεθοδολογίες πρακτόρων (Agent) λογισμικού.....	87
8.7.1 GAIA.....	87
8.7.2 Prometheus.....	87
8.7.3 FIPA AUML .....	87
8.8 Εξοπλισμός πεδίου και ελεγκτικός εξοπλισμός ενός κατανεμημένου συστήματος.....	88
8.8.1 Συμπεριφορά εντός κατανεμημένων συστημάτων .....	89
8.8.2 Υλικό ελέγχου κατανεμημένων συστημάτων .....	89
9 Βιβλιογραφία.....	93

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Ιστορία του CAN

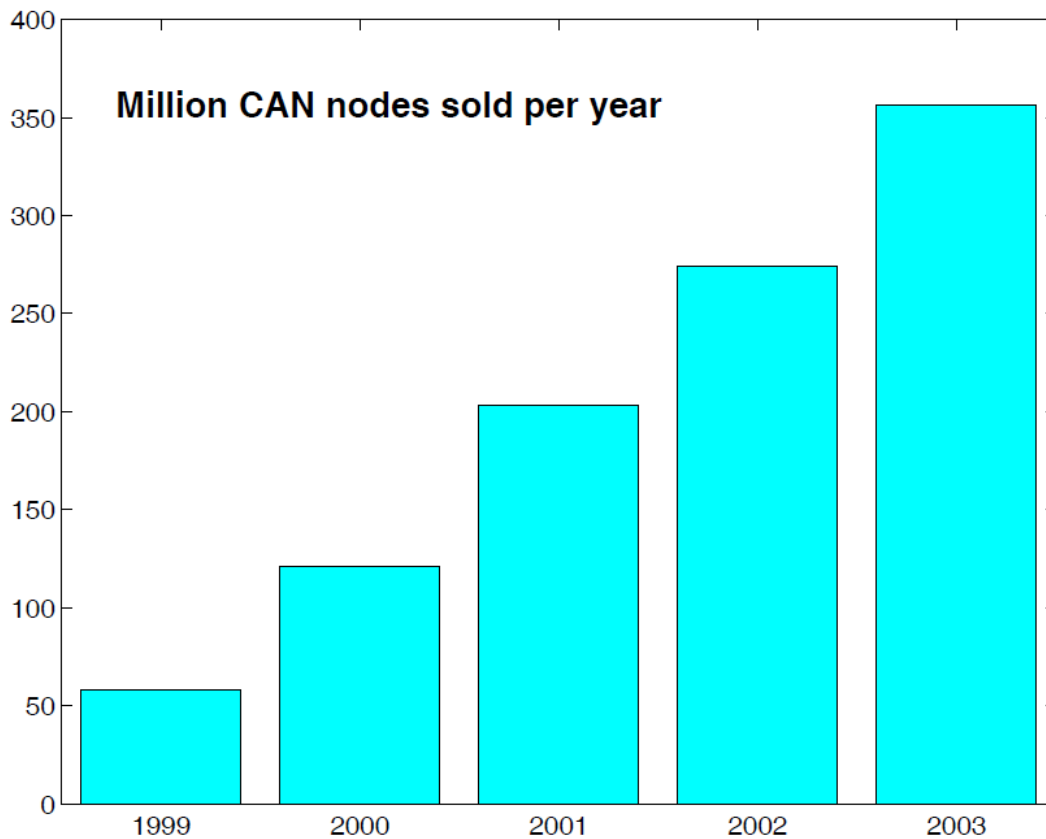
Τον Φεβρουάριο του 1986, η εταιρία Robert Bosch GmbH εισήγαγε το σειριακό σύστημα διαύλου Controller Area Network (CAN) στο συνέδριο της Society of Automotive Engineers (SAE). Αυτό αποτέλεσε την αφετηρία για την εμφάνιση ενός από τα πιο επιτυχημένα πρωτόκολλα δικτύου που έχουν ποτέ εμφανιστεί. Σήμερα, σχεδόν κάθε καινούργιο επιβατικό αυτοκίνητο που κατασκευάζεται είναι εξοπλισμένο με τουλάχιστον ένα δίκτυο CAN. Επίσης χρησιμοποιείται σε άλλους τύπους οχημάτων όπως σε τρένα, πλοία, αεροπλάνα καθώς και στη βιομηχανία.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, οι μηχανικοί της Bosch μελετούσαν την πιθανότητα χρησιμοποίησης γνωστών πρωτοκόλλων δικτύου σε επιβατικά αυτοκίνητα. Επειδή κανένα από τα διαθέσιμα πρωτόκολλα δικτύου δεν ήταν σε θέση να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της αυτοκινητοβιομηχανίας, ο Uwe Kiencke ξεκίνησε την ανάπτυξη ενός νέου σειριακού συστήματος επικοινωνίας. Το νέο πρωτόκολλο κυρίως δημιουργήθηκε για να προσθέσει νέες λειτουργίες. Παράλληλα η μείωση των καλωδιώσεων ήταν απλώς ένα ακόμα θετικό αποτέλεσμα, όχι όμως η κινητήρια δύναμη πίσω από την ανάπτυξη του πρωτοκόλλου CAN. Μηχανικοί από τη Mercedes-Benz ασχολήθηκαν για τις προδιαγραφές του νέου συστήματος, το ίδιο έκανε και η Intel σαν κύριος υποψήφιος προμηθευτής του υλικού για τα νέα συστήματα. Ο καθηγητής Dr. Wolfhard Lawrenz από το Πανεπιστήμιο Εφαρμοσμένων Επιστημών του Braunschweig-Wolfenbüttel της Γερμανίας, ο οποίος είχε προσληφθεί ως σύμβουλος, έδωσε στο νέο πρωτόκολλο το όνομα Controller Area Network (CAN). Επίσης ακαδημαϊκή βοήθεια έδωσε και ο καθηγητής Dr. Horst Wettstein από το Πανεπιστήμιο της Καρλσρούης.

Στη συνέχεια εισήχθη το multi-master πρωτόκολλο δικτύου, βασισμένο σε ένα μη καταστρεπτικό μηχανισμό διαιτησίας, ο οποίος επιτρέπει την πρόσβαση στο δίκτυο, στο μήνυμα με την υψηλότερη προτεραιότητα χωρίς καθυστερήσεις. Επιπλέον εφαρμόστηκαν διάφοροι μηχανισμοί ανίχνευσης σφαλμάτων, αντιμετώπισης λαθών όπως επίσης και μηχανισμοί αυτόματης αποσύνδεσης ελαττωματικών κόμβων, προκειμένου να διατηρηθεί η ομαλή επικοινωνία μεταξύ των υπολοίπων κόμβων. Αρχικά η Intel παρέδωσε το πρώτο τσιπ ελεγκτή CAN, το 82526. Λίγο αργότερα, η Philips Semiconductors παρέδωσε το 82C200. Αυτοί οι δύο ελεγκτές CAN είχαν αρκετές διαφορές όσον αφορά το φιλτράρισμα, την αποδοχή και το χειρισμό των μηνυμάτων. Από τη μία πλευρά, η FullCAN από την Intel απαιτεί λιγότερο φορτίο της CPU του μικροελεγκτή από την BasicCAN της

Philips. Από την άλλη πλευρά, η FullCAN ήταν περιορισμένη όσον αφορά τον αριθμό των μηνυμάτων που θα μπορούσε να λάβει.

Στην εικόνα 1 φαίνεται η ραγδαία ετήσια αύξηση χρησιμοποίησης ολοκληρωμένων κυκλωμάτων αναμεταδοτών CANbus [13], [15].



Εικόνα 1. Πωλήσεις ολοκληρωμένων κυκλωμάτων αναμεταδοτών CANbus [8].

## 1.2 Ιστορική Αναδρομή CANbus

Στον πίνακα 1 παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή του CAN πρωτοκόλλου.

1983	Έναρξη της Bosch για την ανάπτυξη ενός δικτύου εντός του οχήματος.
1986	Επίσημη εισαγωγή του CAN πρωτοκόλλου.
1987	Πρώτη χρησιμοποίηση τσιπ ελεγκτή CAN από την Intel και τη Philips Semiconductors.
1991	Δημοσίευση των προδιαγραφών CAN 2.0 από την Bosch.
1991	Εμφάνιση του CAN Kingdom, πρωτόκολλο υψηλότερου στρώματος βασισμένο στο CAN δημοσιευμένο από τον Kvaser.
1992	Ίδρυση του CAN in Automation (CiA) από διεθνείς χρήστες και τους κατασκευαστές.
1992	Εμφάνιση του πρωτοκόλλου CAN Application Layer (CAL) που δημοσιεύθηκε από τη CiA.
1992	Εμφάνιση των πρώτων αυτοκίνητων από την Mercedes-Benz που χρησιμοποιούν το δίκτυο CAN.
1993	Δημοσίευση του προτύπου ISO 11898.
1994	1ο Διεθνές Συνέδριο CAN που οργάνωσε η CiA.
1994	Εμφάνιση του πρωτοκόλλου DeviceNet από την Allen-Bradley.
1995	Επανεκδόση του προτύπου ISO 11898 με δημοσίευση της εκτεταμένης μορφής πλαισίου.
1995	Εμφάνιση του πρωτοκόλλου CANopen που δημοσιεύθηκε από τη CiA.
2000	Εμφάνιση του time-triggered communication πρωτοκόλλου για CAN (TTCAN)

Πίνακας 1. Ιστορική αναδρομή CANbus.



## 2 Χαρακτηριστικά

### 2.1 Τυποποίηση

Η προδιαγραφή CAN (version 2,0) υποβλήθηκε για διεθνή τυποποίηση στις αρχές της δεκαετίας του 1990 από τη Bosch. Μετά από λίγα χρόνια, τον Νοέμβριο του 1993, δημοσιεύθηκε το πρότυπο ISO 11898 για CAN. Επιπλέον το πρωτόκολλο CAN ορίζεται επίσης ως ένα φυσικό στρώμα για ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 1 Mbit/s. Παράλληλα, ένας ανεκτικός σε σφάλματα τρόπος μετάδοσης δεδομένων μέσω CAN τυποποιείται στο πρότυπο ISO 11519-2. Το 1995, το πρότυπο ISO 11898 επεκτάθηκε με προσθήκη που περιγράφει την 29 bit ID του CAN που θα αναλυθεί παρακάτω. Επειδή κάποιες δημοσιευμένες προδιαγραφές και τυποποιήσεις CAN περιείχαν λάθη ή ήταν ελλιπείς, η Bosch φρόντισε ώστε όλοι να πρέπει να συμμορφώνονται με τα ολοκληρωμένα κυκλώματά της σαν μοντέλο αναφοράς [4], [13], [15].

### 2.2 Εφαρμογές

Αν και το CANbus αναπτύχθηκε αρχικά για χρήση σε επιβατικά αυτοκίνητα, πολλοί κλάδοι ήταν αυτοί που ενδιαφέρθηκαν για τη χρησιμοποίησή του. Στη Φινλανδία, ο κατασκευαστής ανελκυστήρων Kone χρησιμοποίησε το CANbus. Η Σουηδική Kvaser πρότεινε το CAN σε ορισμένους κατασκευαστές μηχανημάτων κλωστοϋφαντουργίας (Lindauer Dornier και Sulzer) και τους προμηθευτές τους, σαν το πρωτόκολλο επικοινωνιών εντός της μηχανής. Στην Ολλανδία, η Philips Medical Systems αποφάσισε να χρησιμοποιήσει το CAN για την εσωτερική δικτύωση των μηχανών ακτίνων X.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, δημιουργήθηκε η ανάγκη για να τυποποιηθούν όλες αυτές οι διαφορετικές λύσεις. Κατά τους πρώτους μήνες του 1992, ο Holger Zeltwanger (editor in chief του περιοδικού VMEbus), συγκέντρωσε τους χρήστες και τους κατασκευαστές για να δημιουργήσει μια ουδέτερη πλατφόρμα για την τεχνική αναβάθμιση του CAN καθώς και για την εμπορία του συστήματος.

Τον Μάρτιο του 1992 ιδρύεται επίσημα η CAN in Automation (CiA) από τους διεθνείς χρήστες και τους κατασκευαστές. Η πρώτη τεχνική δημοσίευση ήταν το πρότυπο ISO 11898. Ένα από τα πρώτα καθήκοντα της CiA ήταν ο καθορισμός ενός στρώματος εφαρμογής CAN. Χρησιμοποιώντας το υπάρχον υλικό της Philips Medical Systems και της STZP, μαζί με τη βοήθεια των άλλων μελών της CiA, αναπτύχθηκε το CAN Application Layer (CAL), που ονομάζεται επίσης το “Πράσινο

Βιβλίο”. Για την περαιτέρω ανάπτυξη των προδιαγραφών και για να οργανωθεί η ανταλλαγή πληροφοριών από το 1994, πραγματοποιείται ένα Ετήσιο Διεθνές Συνέδριο CAN.

### 2.3 Υλικό

Οι προμηθευτές ημιαγωγών που εφαρμόζουν δικτύωση CAN στις συσκευές τους εστιάζουν κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1990, η Infineon Technologies (πρώην Siemens Semiconductors) και η Motorola έχουν αποστείλει μεγάλες ποσότητες ελεγκτών CAN στους ευρωπαίους κατασκευαστές επιβατικών αυτοκινήτων και τους προμηθευτές τους. Το 1994 η NEC έβγαλε στην αγορά το μοντέλο 72005.

Από το 1992, η Mercedes-Benz χρησιμοποιήσει CAN στην ανώτερη τάξη των επιβατικών αυτοκινήτων της. Καταρχήν, οι ηλεκτρονικές μονάδες ελέγχου της διαχείρισης του κινητήρα συνδέθηκαν μέσω CAN. Σε δεύτερο στάδιο ακολούθησαν οι μονάδες ελέγχου που απαιτούνται για τα ηλεκτρονικά του υπόλοιπου αυτοκινήτου. Τέθηκαν σε λειτουργία δύο ξεχωριστά συστήματα CAN τα οποία συνδέονται μέσω πυλών (gateways). Στη συνέχεια και άλλοι κατασκευαστές αυτοκινήτων όπως οι BMW, Fiat, Renault, Saab, Volkswagen, Volvo χρησιμοποιούν δύο δίκτυα CAN στα επιβατικά τους αυτοκίνητα.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η εταιρεία Cincinnati Milacron ξεκίνησε μια κοινοπραξία μαζί με τις Allen-Bradley και Honeywell Microcontrollers σχετικά με τον έλεγχο και τις επικοινωνίες με βάση το CAN. Συγκρούσεις οδήγησαν τις Allen-Bradley και Honeywell να συνεχίσουν το έργο τους χωριστά, ενώ η Cincinnati Milacron κατέρρευσε. Αυτό οδήγησε στα πρωτόκολλα υψηλότερων επιπέδων DeviceNet της Allen-Bradley και Smart Distributed System (SDS) της Honeywell, τα οποία παρουσιάζουν ομοιότητες στα χαμηλότερα στρώματα της επικοινωνίας. Στις αρχές του 1994 η Allen-Bradley μετέτρεψε την προδιαγραφή DeviceNet σε Open DeviceNet Vendor Association (ODVA), κίνηση η οποία ενίσχυσε τη δημοτικότητα και χρήση του DeviceNet. Η Honeywell δεν κατάφερε να οδηγήσει σε παρόμοια επιτυχία το SDS. Το DeviceNet αναπτύχθηκε παραπάνω και ειδικά στο κομμάτι της αυτοματοποίησης εργοστασίων και έχει καταστεί το μεγαλύτερο σύστημα CAN σε αυτό το συγκεκριμένο τμήμα της αγοράς στις ΗΠΑ.

Από το 1993, στο πλαίσιο του προγράμματος Esprit, μια ευρωπαϊκή κοινοπραξία με επικεφαλής την Bosch είχε αναπτύξει ένα πρωτότυπο για να γίνει το CANopen. Ήταν μια προσπάθεια βασισμένη στο CAN Application Layer για την εσωτερική δικτύωση των μονάδων παραγωγής. Από

την ακαδημαϊκή πλευρά, συμμετείχαν ο καθηγητής Dr. Gerhard Gruhler από το Πανεπιστήμιο Εφαρμοσμένων Επιστημών στο Reutlingen της Γερμανίας και ο Dr. Μοχάμεντ Φαρσί από το Πανεπιστήμιο του Newcastle του Ηνωμένου Βασιλείου. Έτσι, η προδιαγραφή CANopen παραδόθηκε στη CiA για περαιτέρω ανάπτυξη. Το 1995, η πλήρως αναθεωρημένη έκδοση CANopen επικοινωνιών δημοσιεύθηκε και μέσα σε πέντε χρόνια έγινε το πιο σημαντικό ενσωματωμένο δίκτυο στον κόσμο [49], [50].

Τα πρώτα δίκτυα CANopen χρησιμοποιήθηκαν για την εσωτερική επικοινωνία μηχανημάτων. Το CANopen διαθέτει πολύ μεγάλη ευελιξία και δυνατότητα παραμετροποίησης. Το πρωτόκολλο υψηλού στρώματος, έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές πολύ διαφορετικές περιοχές εφαρμογής όπως στους βιομηχανικούς αυτοματισμούς, στα ηλεκτρονικά για ναυτιλία και για στρατιωτικά οχήματα.

Το CANopen χρησιμοποιείται κυρίως στην Ευρώπη με παραδείγματα τις μηχανές injection στην Ιταλία, τα πριόνια ξύλου και μηχανημάτων στη Γερμανία, τις μηχανές τσιγάρων στη Μεγάλη Βρετανία, τους γερανούς στη Γαλλία, το χειρισμό μηχανημάτων στην Αυστρία, και τις εταιρίες κατασκευής ρολογιών στην Ελβετία. Στις Ηνωμένες Πολιτείες το CANopen εφαρμόζεται κυρίως σε περνοφόρα και χρησιμοποιείται σε μηχανήματα διαλογής επιστολών.

Το CANopen όχι μόνο καθορίζει το επίπεδο εφαρμογής και το προφίλ της επικοινωνίας, αλλά και ένα πλαίσιο για προγραμματιζόμενα συστήματα, όπως τη διασύνδεση διαφορετικών συσκευών και προφίλ εφαρμογών. Αυτός είναι ένας σημαντικός λόγος γιατί ολόκληροι τομείς της βιομηχανίας (π.χ. μηχανήματα εκτύπωσης, θαλάσσιες εφαρμογές, ιατρικά συστήματα) αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν το CANopen στα τέλη της δεκαετίας του 1990 [13].

## 2.4 Τεχνολογία

Το CAN bus είναι ένα πρωτόκολλο σειριακής πολυεκπομπής (multi-master) για τη σύνδεση ηλεκτρονικών μονάδων ελέγχου.

Δηλαδή κάθε κόμβος είναι σε θέση να στέλνει ή να λαμβάνει μηνύματα, αλλά όχι να στέλνει και να λαμβάνει ταυτόχρονα. Ένα μήνυμα αποτελείται κυρίως από ένα ID, το οποίο αντιπροσωπεύει την προέλευση του μηνύματος, και έχει μέγεθος έως 8 bit. Τα μηνύματα μεταδίδονται σειριακά πάνω στο δίκτυο. Το σήμα κωδικοποιείται σε μορφή non return to zero (NRZ) και ανιχνεύεται από όλους τους κόμβους.

Οι συσκευές που είναι συνδεδεμένες σε ένα δίκτυο CAN bus είναι συνήθως αισθητήρες,

ενεργοποιητές καθώς και άλλες συσκευές ελέγχου. Αυτές οι συσκευές δεν συνδέονται άμεσα με το δίκτυο, αλλά μέσω ενός επεξεργαστή και ενός ελεγκτή CAN.

Αν το δίκτυο είναι ελεύθερο, κάθε κόμβος μπορεί να αρχίσει να μεταδίδει. Αν δύο ή περισσότεροι κόμβοι αρχίσουν την αποστολή μηνυμάτων την ίδια στιγμή, το μήνυμα με το πιο σημαντικό ID (το οποίο έχει περισσότερα κυρίαρχα bits, δηλαδή μηδενικά) θα αντικαταστήσει τους άλλους κόμβους με λιγότερο σημαντικά ID, έτσι ώστε τελικά μόνο το πιο σημαντικό μήνυμα να παραμείνει και να παραληφθεί από όλους τους άλλους κόμβους. Ο μηχανισμός αυτός αναφέρεται ως προτεραιότητα διαύλου. Μηνύματα με ID κόμβου αριθμητικά μικρότερη σε σχέση με τα άλλα ID κόμβων, έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα και μεταδίδονται πρώτα.

Κάθε κόμβος απαιτεί:

#### Host Processor

- Ο κεντρικός επεξεργαστής αποφασίζει τι σημαίνουν τα μηνύματα και ποια μηνύματα θέλει να μεταδώσει.
- Αισθητήρες, ενεργοποιητές και συσκευές ελέγχου μπορούν να συνδέονται με τον οικείο επεξεργαστή (host processor).

#### CAN Controller

- Λήψη: Ο CAN ελεγκτής αποθηκεύει τα bit που λαμβάνει από το δίκτυο σειριακά μέχρις ότου ένα ολόκληρο μήνυμα είναι διαθέσιμο, το οποίο μπορεί στη συνέχεια να παραλάβει ο host processor.
- Αποστολή: Ο οικείος επεξεργαστής αποθηκεύει τα μηνύματα εκπομπής του σε έναν CAN controller, ο οποίος μεταδίδει τα bits σειριακά στο δίκτυο.

#### Πομποδέκτης

- Λήψη: Προσαρμόζει τα επίπεδα σήματος του δικτύου σε επίπεδα που ο ελεγκτής μπορεί να δεχθεί. Επιπρόσθετα έχει κύκλωμα προστασίας που προστατεύει τον ελεγκτή CAN.
- Μετάδοση: Μετατρέπει το bit μετάδοσης σήματος που λαμβάνεται από τον ελεγκτή CAN μέσα σε ένα σήμα που στέλνεται στο δίκτυο.

Στα δίκτυα CAN bus επιτρέπεται ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μέχρι 1 Mbit/s σε μήκος δικτύου κάτω από 40 m. Η μείωση του ρυθμού μετάδοσης επιτρέπει μεγαλύτερες αποστάσεις του δικτύου (π.χ. 500 μ. στα 125 kbit/s).

Στον πίνακα 2 φαίνονται οι αποστάσεις και οι ταχύτητες ενός δικτύου CAN.

Bit rate Bus length <sup>(1)</sup>	Nominal bit time $t_b$	Number of time quanta per bit	Length of time quantum $t_q$	Location of sample point	BTR 0 at 16 MHz (82C200)	BTR 1 at 16 MHz (82C200)
1 Mbit/s 25 m	1 $\mu$ s	8	125 ns	6 $t_q$ (750ns)	00h	14h
800 kbit/s 50 m	1.25 $\mu$ s	10	125 ns	8 $t_q$ (1 $\mu$ s)	00h	16h
500 kbit/s 100 m	2 $\mu$ s	16	125 ns	14 $t_q$ (1.75 $\mu$ s)	00h	1Ch
250 kbit/s 250 m <sup>(2)</sup>	4 $\mu$ s	16	250 ns	14 $t_q$ (3.5 $\mu$ s)	01h	1Ch
125 kbit/s 500 m <sup>(2)</sup>	8 $\mu$ s	16	500 ns	14 $t_q$ (7 $\mu$ s)	03h	1Ch
50 kbit/s 1000 m <sup>(3)</sup>	20 $\mu$ s	16	1.25 $\mu$ s	14 $t_q$ (17.5 $\mu$ s)	09h	1Ch
20 kbit/s 2500 m <sup>(3)</sup>	50 $\mu$ s	16	3.125 $\mu$ s	14 $t_q$ (43.75 $\mu$ s)	18h	1Ch
10 kbit/s 5000 m <sup>(3)</sup>	100 $\mu$ s	16	6.25 $\mu$ s	14 $t_q$ (87.5 $\mu$ s)	31h	1Ch

Πίνακας 2. Αποστάσεις και ταχύτητες δικτύου CANbus.

Το πρωτόκολλο σύνδεσης δεδομένων CAN περιγράφεται στο ISO 11898-1 (2003). Αυτό περιγράφει κυρίως το στρώμα ζεύξης δεδομένων που αποτελείται από τα υποστρώματα δικτύου LLC (Logical Link Control) και MAC (Media Access Control). Επίσης περιγράφει και ορισμένες πτυχές του φυσικού επιπέδου του μοντέλου OSI. Όλα τα υπόλοιπα στρώματα του πρωτοκόλλου επιλέγονται από το σχεδιαστή του δικτύου.

## 2.5 Μετάδοση Δεδομένων

Το CAN μπορεί να προσφέρει μετάδοση με παράλληλη διαχείριση των σημαντικών μηνυμάτων. Συγκεκριμένα, ένα μήνυμα CAN που μεταδίδεται με την υψηλότερη προτεραιότητα θα φτάσει πρώτο και ο κόμβος που μεταδίδει το χαμηλότερης προτεραιότητας μήνυμα θα ειδοποιηθεί και θα

περιμένει. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μετάδοση δεδομένων CAN μέσω ενός δυαδικού μοντέλου όπου το σημαντικό bit είναι το λογικό 0 και το λιγότερο σημαντικό bit είναι το λογικό 1. Δηλαδή εάν ένας κόμβος μεταδίδει ένα υψηλής προτεραιότητας bit και ένας άλλος κόμβος μεταδίδει ένα χαμηλής προτεραιότητας bit, θα προηγηθεί το πρώτο (εφαρμόζεται ένα λογικό AND μεταξύ των δύο). Συνοπτικά το παραπάνω απεικονίζεται στον πίνακα 3.

#### Πίνακας Αληθείας όταν εκπέμπουν δύο κόμβοι

	Υψηλή Προτεραιότητα	Χαμηλή Προτεραιότητα
Υψηλή Προτεραιότητα	Υψηλή Προτεραιότητα	Υψηλή Προτεραιότητα
Χαμηλή Προτεραιότητα	Υψηλή Προτεραιότητα	Χαμηλή Προτεραιότητα

Πίνακας 3. Πίνακας αληθείας εκπομπής δύο κόμβων.

Έτσι, αν ένα χαμηλής προτεραιότητας bit μεταδοθεί ενώ παράλληλα μεταδίδεται ένα υψηλής προτεραιότητας bit, εμφανίζεται το υψηλής προτεραιότητας, σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση οι συγκρούσεις είναι αόρατες. Το μεταδιδόμενο bit εμφανίζεται με τη δημιουργία μιας τάσης κατά μήκος των καλωδίων, ενώ το χαμηλής προτεραιότητας δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει το δίκτυο. Έτσι αν ο κάθε κόμβος θέτει μια διαφορά τάσης τότε θα μπορεί το μήνυμα του να είναι ορατό σε όλους τους κόμβους. Επίσης δεν υπάρχει καθυστέρηση στα υψηλής προτεραιότητας μηνύματα. Ο κόμβος που θέλει να μεταδώσει το χαμηλής προτεραιότητας μήνυμα αυτόματα επιχειρεί να το αναμεταδώσει έξι χρόνους μετά το τέλος της μετάδοσης του υψηλής προτεραιότητας μηνύματος. Όταν δύο ή περισσότερες συσκευές αρχίζουν την μετάδοση την ίδια στιγμή, δίνεται προτεραιότητα με βάση ένα εσωτερικό σύστημα διαιτησίας που αποφασίζει σε ποια συσκευή θα χορηγηθεί η άδεια μετάδοσης. Έτσι το CAN καθίσταται κατάλληλο δίκτυο επικοινωνίας για συστήματα πραγματικού χρόνου.

Για την αποφυγή συγκρούσεων ακολουθείται μια διαδικασία διαιτησίας. Κάθε κόμβος που μεταδίδει παράλληλα παρακολουθεί την κατάσταση του δικτύου και συγκρίνει το bit που λαμβάνει με το bit που μεταδίδει. Εάν ληφθεί ένα σημαντικό bit κατά την μετάδοση ενός μη σημαντικού bit, τότε ο κόμβος σταματάει τη μετάδοση. Η διαδικασία της διαιτησίας εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της μετάδοσης αναγνωριστικών μνημάτων. Κάθε κόμβος που αρχίζει να μεταδίδει την ίδια στιγμή

στέλνει το ID του και το υψηλής προτεραιότητας bit 0. Έαν ο κόμβος έχει για ID ένα μεγαλύτερο αριθμό (χαμηλότερη προτεραιότητα) από αυτόν που στέλνει, θα στέλνει μαζί του το χαμηλής προτεραιότητας bit 1. Με τον τρόπο αυτό παραχωρεί προτεραιότητα στη μετάδοση σε υψηλότερης σημαντικότητας κόμβους.

Για παράδειγμα έστω ένα 11-bit ID CAN δίκτυο, με δύο κόμβους που έχουν ID 15 (00000001111) και 16 (00000010000). Εάν οι παραπάνω κόμβοι μεταδίδουν ταυτόχρονα, ο καθένας θα μεταδώσει τα πρώτα έξι 0 της ταυτότητάς του χωρίς να έχει ληφθεί κάποια απόφαση της διαδικασίας διαίτησίας που θα εφαρμοστεί. Όταν θα μεταδοθεί το 7<sup>ο</sup> bit, ο κόμβος με το ID 16 μεταδίδει το 1 (χαμηλής προτεραιότητας bit), και ο κόμβος με το ID 15 μεταδίδει το 0 (υψηλής προτεραιότητας bit). Όταν συμβαίνει αυτό, ο κόμβος με το ID 16 θα σταματήσει τη μετάδοση και θα επιτρέψει στο κόμβο με ID 15 να συνεχίσει την μετάδοσή του. Αυτό εξασφαλίζει ότι ο κόμβος που θα έχει μικρότερη τιμή για ID θα προηγείται πάντοτε των υπολοίπων στη μετάδοση των μηνυμάτων.

## 2.6 Κατανομή ID

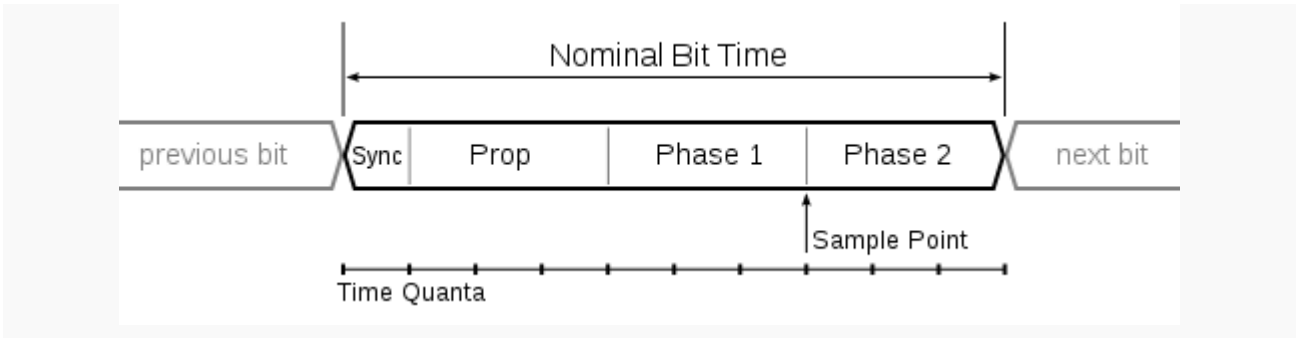
Τα ID των κόμβων πρέπει να είναι μοναδικά σε ένα δίκτυο CAN, αλλιώς δύο κόμβοι θα συνεχίσουν να μεταδίδουν και μετά το τέλος του αλγορίθμου διαίτησίας ID με αποτέλεσμα να προκληθεί σφάλμα στη μετάδοση.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η επιλογή των ID για μηνύματα γινόταν απλά με βάση την αναγνώριση του τύπου των δεδομένων και του κόμβου που αποστέλλει, ωστόσο επειδή το ID χρησιμοποιείται επίσης για την προτεραιότητα του μηνύματος, αυτό οδήγησε σε κακές επιδόσεις του δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται μια χαμηλή χρήση του διαύλου CAN, περίπου 30%, συνήθως για να εξασφαλιστεί ότι όλα τα μηνύματα θα τηρούν τις προθεσμίες τους. Ωστόσο, αν τα ID καθορίζονται με βάση την προθεσμία του μηνύματος, τότε η χρήση του δικτύου μπορεί να φτάσει το 70 - 80% πριν να χαθούν οι προθεσμίες που έχουν τεθεί.

## 2.7 Χρονοδιάγραμμα BIT

Κάθε κόμβος σε ένα δίκτυο CAN έχει το δικό του ρολόι, το οποίο δεν αποστέλλεται κατά τη διάρκεια της μετάδοσης δεδομένων. Ο συγχρονισμός γίνεται διαιρώντας κάθε bit του πλαισίου σε έναν αριθμό τμημάτων: συγχρονισμός, διάδοση, φάση 1 και φάση 2. Το μήκος της κάθε φάσης τμήματος μπορεί να ρυθμίζεται με βάση το δίκτυο και τις συνθήκες του κόμβου. Το σημείο

δειγματοληψίας βρίσκεται μεταξύ των φάσεων 1 και 2, το οποίο βοηθά στο συνεχή συγχρονισμό. Ο συνεχής συγχρονισμός με τη σειρά του επιτρέπει στο δέκτη να είναι σε θέση να διαβάσει σωστά τα μηνύματα. Σχηματικά το παραπάνω απεικονίζεται στην εικόνα 2.



Εικόνα 2. Χρονοδιάγραμμα BIT.

## 2.8 Επίπεδα

Το πρωτόκολλο CAN, όπως και πολλά πρωτόκολλα δικτύωσης, μπορεί να αναλυθεί στα εξής στρώματα:

### Στρώμα εφαρμογής

Όλες οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν το δίκτυο CAN.

### Στρώμα αντικειμένου

- Φιλτράρισμα μηνύματος
- Χειρισμός και κατάσταση μηνύματος

### Στρώμα μεταφοράς

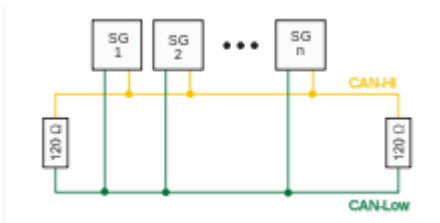
Το μεγαλύτερο μέρος του προτύπου CAN επικεντρώνεται στο στρώμα μεταφοράς. Το στρώμα μεταφοράς λαμβάνει μηνύματα από το φυσικό στρώμα και μεταδίδει τα μηνύματα στο στρώμα αντικειμένου. Το στρώμα μεταφοράς είναι υπεύθυνο για το χρονοδιάγραμμα, το συγχρονισμό, τη διαμόρφωση του μηνύματος, τη διαιτησία, την αναγνώριση, τον εντοπισμό σφαλμάτων, τη σηματοδότηση και τον περιορισμό των σφαλμάτων.



Εκτελεί:

- Ανίχνευση σφάλματος
- Επικύρωση μηνύματος
- Αναγνώριση
- Διαιτησία
- Διαμόρφωση του μηνύματος
- Ταχύτητα μεταφοράς και χρονισμού
- Πληροφορίες δρομολόγησης

### Φυσικό στρώμα



Εικόνα 3. Δείγμα ηλεκτρικής τοπολογίας δικτύου CANbus με τερματικές αντιστάσεις.

Ο διάυλος CAN (ISO 11898-1:2003) ορίζει αρχικά το πρωτόκολλο επιπέδου σύνδεσης με μόνο αφηρημένες απαιτήσεις για το φυσικό επίπεδο, π.χ. υποστηρίζοντας τη χρήση ενός μέσου με δυνατότητα πολλαπλής πρόσβασης στο επίπεδο των bit μέσω της χρήσης σημαντικών και μη σημαντικών καταστάσεων [30]. Τα ηλεκτρικά στοιχεία του φυσικού επιπέδου (τάση, ρεύμα, αριθμός αγωγών) έχουν καθοριστεί στο ISO11898-2:2003 [31]. Ωστόσο, οι μηχανικές πτυχές του φυσικού στρώματος (τύπος σύνδεσης, τα χρώματα καλωδίων, ετικέτες, pin-outs) δεν έχουν ακόμη επίσημα καθοριστεί, με αποτέλεσμα μια ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου (ECU) ενός αυτοκινήτου να έχει συνήθως ένα συγκεκριμένο τύπο διασύνδεσης κόμβων για το δίκτυο CANbus. Παρόλα αυτά, αρκετά πρότυπα έχουν προκύψει, με πιο συνηθισμένο το 9-pin D-sub type male connector με το ακόλουθο pin-out:

- pin 2: CAN-Low (CAN-)
- pin 3: GND (Γείωση)
- pin 7: CAN-High (CAN +)
- pin 9: CAN V + (Ισχύς)

Στην εικόνα 3 απεικονίζεται η ηλεκτρική τοπολογία του CANbus καθώς και οι τερματικές αντιστάσεις. Το παραπάνω πρότυπο μπορεί να υλοποιηθεί για κόμβους που έχουν τόσο αρσενικά όσο και θηλυκά 9-pin D-sub connectors ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους και παράλληλα μέσα στον κόμβο. Το δίκτυο Canbus τροφοδοτείται από το αρσενικό βύσμα ενός κόμβου και αντλεί τροφοδοσία από το θηλυκό βύσμα ενός κόμβου. Αυτό ακολουθεί την ηλεκτρική σύμβαση που περιγράφει ότι οι πηγές ενέργειας τερματίζονται σε θηλυκά βύσματα. Η μη τυπική διασύνδεση κόμβων ενός τέτοιου δικτύου θα μείωνε την αξιοπιστία του και παράλληλα θα προκαλούσε την αύξηση του κόστους του.

Η απουσία μιας πλήρους προδιαγραφής απελευθέρωσε το δίκτυο CANbus από τους περιορισμούς και την πολυπλοκότητα της φυσικής υλοποίησης. Ωστόσο, άφησε το δίκτυο CANbus εκτεθειμένο σε θέματα διαλειτουργικότητας εξαιτίας μηχανικών ασυμβατότητων.

Η προστασία από θορύβους στο ISO 11898-2:2003 επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση μιας αντίστασης 120 ohms σε κάθε άκρο του διαύλου [32]. Στα δίκτυα CANbus, παρατηρείται ισορροπημένη λειτουργία της γραμμής, όπου το ρεύμα σε μία γραμμή σήματος είναι ακριβώς ίδιο με το ρεύμα στην αντίθετη κατεύθυνση. Δηλαδή παρέχει μία ανεξάρτητη, σταθερή αναφορά 0 V για τους δέκτες. Πρακτικά έχει αποδειχθεί ότι το δίκτυο CANbus πρέπει να χρησιμοποιεί ένα ζευγάρι συνεστραμμένων καλωδίων με θωράκιση για την ελαχιστοποίηση των εκπομπών RF που μειώνουν την ευαισθησία στα ήδη θορυβώδη περιβάλλοντα λειτουργίας του CANbus.

Το πρότυπο ISO 11898-2 παρέχει κάποια προστασία απο θορύβους σε κοινή τάση λειτουργίας μεταξύ πομπού και δέκτη [31]. Αυτό επιτυγχάνεται έχοντας ένα κοινό 0 V κατά μήκος του καλωδίου για να διατηρήσει έναν υψηλό βαθμό της τάσης σύνδεσης μεταξύ των κόμβων. Ο προτεινόμενος σχεδιασμός παρέχει μία κοινή παροχή για όλους τους πομποδέκτες. Η πραγματική τάση που πρόκειται να εφαρμοστεί στο δίκτυο εξαρτάται απο την εφαρμογή και δεν ορίζεται επίσημα. Τυπικές τιμές της τάσης τροφοδοσίας σε τέτοια δίκτυα είναι 7 έως 30 V. Ωστόσο, η έλλειψη ενός επίσημου προτύπου σημαίνει ότι οι σχεδιαστές του συστήματος είναι υπεύθυνοι για τη συμβατότητα της εφαρμογής.

Το παραπάνω πρότυπο περιγράφει την εφαρμογή ηλεκτρικού σήματος με τερματική αντίσταση σε κάθε άκρο του διαύλου. Στην περίπτωση μιας σημαντικής κατάστασης ενεργοποιείται από έναν ή περισσότερους πομπούς και το CAN - παράγει 0 V και ταυτόχρονα το CAN + παράγει 5 V σχηματίζοντας έτσι μία διαδρομή ρεύματος διαμέσου των αντιστάσεων οι οποίες τερματίζουν το δίκτυο. Ως εκ τούτου, οι αντιστάσεις τερματισμού αποτελούν βασικό συστατικό του συστήματος

σηματοδότησης και συμπεριλαμβάνονται μόνο για να μην περιοριστεί η ανάκλαση του κύματος σε υψηλότερη συχνότητα. Κατά τη διάρκεια μιας μη σημαντικής κατάστασης οι γραμμές σήματος και αντιστάτη παραμένουν σε μία κατάσταση υψηλής σύνθετης αντίστασης σε σχέση με τις δύο γραμμές του δικτύου. Οι τάσεις τόσο στο CAN+ όσο και στο CAN- τείνουν να ασθενούν προς το μισό της τάσης των γραμμών. Κατά τη διάρκεια μιας σημαντικής κατάστασης οι γραμμές σήματος και αντιστάτη παραμένουν σε κατάσταση χαμηλής σύνθετης αντίστασης σε σχέση με τις γραμμές του δικτύου, έτσι ώστε ρεύμα να ρέει διαμέσου του αντιστάτη. Η CAN+ τάση τείνει στα +5 V και η CAN- τείνει στα 0 V. Η μη σημαντική κατάσταση εμφανίζεται στο δίκτυο μόνο όταν κανένας από τους πομπούς δεν στέλνει bit σημαντικής κατάστασης. Ανεξάρτητα από την κατάσταση σήματος οι γραμμές σημάτων είναι πάντα σε κατάσταση χαμηλής σύνθετης αντίστασης σε σχέση το ένα με το άλλο λόγω των αντιστάσεων τερματισμού στο τέλος του διαύλου. Η μέτρηση αντίστασης σε οποιοδήποτε κόμβο είναι στα 60 Ohm ενώ οι τερματικές αντιστάσεις του δικτύου είναι 120 Ohm στα δύο άκρα του.

Αυτή η στρατηγική σηματοδότησης διαφέρει σημαντικά από άλλες τεχνολογίες μετάδοσης όπως οι RS-422/3, RS-485, κ.λπ., οι οποίες υποστηρίζουν τρεις καταστάσεις (υψηλή, χαμηλή και ανενεργή) και εξετάζονται στο πεδίο του χρόνου. Η πολλαπλή πρόσβαση στο δίκτυο CANbus επιτυγχάνεται με την ηλεκτρική λογική του συστήματος και υποστηρίζει μόνο δύο καταστάσεις [8], [11], [18], [19].

## **2.10 Πλαίσια**

Ένα δίκτυο CANbus μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να λειτουργεί με δύο διαφορετικούς τύπους μηνύματος ή πλαισίου: το πρότυπο ή βασική μορφή πλαισίου (ή CAN 2,0 A), καθώς και την εκτεταμένη μορφή πλαισίου (ή 2,0 CAN B). Η μόνη διαφορά μεταξύ των δύο τύπων είναι ότι η βασική μορφή υποστηρίζει ένα μήκος 11 bit για το αναγνωριστικό, και το εκτεταμένο υποστηρίζει ένα μήκος 29 bit για το αναγνωριστικό, που αποτελείται από το αναγνωριστικό των 11-bit ("base identifier") και από μια επέκταση των 18-bit ("extended identifier"). Η διάκριση μεταξύ του προτύπου CANbus και της εκτεταμένης μορφής γίνεται με τη χρήση του bit IDE. Στην πρώτη περίπτωση μεταδίδεται ως κυρίαρχο bit, ενώ στη δεύτερη περίπτωση μεταδίδεται ως μη σημαντικό. Μερικοί ελεγκτές CAN που υποστηρίζουν μηνύματα εκτεταμένης μορφής είναι σε θέση να στέλνουν και να λαμβάνουν μηνύματα σε βασική μορφή CAN πλαισίου. Όλα τα πλαίσια ξεκινούν

με ένα start-of-frame (SOF) bit που υποδηλώνει την έναρξη της μετάδοσης του πλαισίου [9].

Το CAN έχει τέσσερις τύπους πλαισίων:

- Πλαίσιο δεδομένων: ένα πλαίσιο που περιέχει τα δεδομένα του κόμβου για τη μετάδοση.
- Απομακρυσμένο πλαίσιο: ένα πλαίσιο που αιτείται τη μετάδοση από ένα συγκεκριμένο ID.
- Πλαίσιο σφάλματος: ένα πλαίσιο που μεταδίδεται από κάθε κόμβο στην περίπτωση ανίχνευσης σφάλματος.
- Πλαίσιο υπερφόρτωσης: ένα πλαίσιο που προσθέτει μια καθυστέρηση μεταξύ του πλαισίου δεδομένων και του απομακρυσμένου πλαισίου.

### 2.10.1 Πλαίσιο Δεδομένων

Το πλαίσιο δεδομένων είναι το μόνο πλαίσιο για την πραγματική μετάδοση δεδομένων. Υπάρχουν δύο μορφές μηνύματος:

- Βασική μορφή πλαισίου: με αναγνωριστικό των 11 bit.
- Εκτεταμένη μορφή πλαισίου: με αναγνωριστικό των 29 bit.

Το πρότυπο CANbus απαιτεί η εφαρμογή να πρέπει οπωσδήποτε να αποδεχθεί τη βασική μορφή πλαισίου και να μπορεί να αποδεχθεί την εκτεταμένη μορφή πλαισίου.

### 2.10.2 Βασική Μορφή Πλαισίου

Στον πίνακα 4 παρουσιάζεται η βασική μορφή πλαισίου.

<u>Όνομα πεδίου</u>	<u>Μήκος bits</u>	<u>Σκοπός</u>
Start-of-frame	1	Υποδηλώνει την έναρξη της μετάδοσης του πλαισίου.
Identifier	11	Ένα μοναδικό ID για τα δεδομένα. Αντιπροσωπεύει επίσης και την προτεραιότητα του μηνύματος.
Remote transmission request (RTR)	1	Σημαντικό bit (0).
Identifier extension bit (IDE)	1	Πρέπει να είναι σημαντικό bit (0) επίσης το συγκεκριμένο bit

		είναι προαιρετικό.
Reserved bit (r0)	1	Δεσμευμένο bit (θα πρέπει να ρυθμιστεί σε σημαντικό (0), αλλά γίνεται δεκτό είτε ως σημαντικό είτε ως μη σημαντικό).
Data length code (DLC)*	4	Αριθμός των bytes των δεδομένων (0-8 bytes)
Data field	0–64 (0-8 bytes)	Τα προς αποστολή δεδομένα (μήκος σε bytes που υπαγορεύονται από τον τομέα DLC)
CRC	15	Κυκλικός έλεγχος (Cyclic Redundancy Check)
CRC delimiter	1	Μη σημαντικό bit (1)
ACK slot	1	Ο πομπός στέλνει ένα μη σημαντικό bit (1) και κάθε δέκτης μπορεί να πάρει τη θέση του στέλλοντας ένα σημαντικό bit (0).
ACK delimiter	1	Μη σημαντικό bit (1)
End-of-frame (EOF)	7	Μη σημαντικό bit (1)

Πίνακας 4. Βασική μορφή πλαισίου.

### 2.10.3 Εκτεταμένη Μορφή Πλαισίου

Στον πίνακα 5 παρουσιάζεται η εκτεταμένη μορφή πλαισίου.

<u>Όνομα πεδίου</u>	<u>Μήκος bits</u>	<u>Σκοπός</u>
Start-of-frame	1	Υποδηλώνει την έναρξη της μετάδοσης του πλαισίου.
Identifier A	11	Πρώτο σκέλος του μοναδικού ID για τα δεδομένα. Αντιπροσωπεύει επίσης και την προτεραιότητα του μηνύματος.
Substitute remote request (SRR)	1	Πρέπει να είναι μη σημαντικό bit (1). Το συγκεκριμένο bit είναι προαιρετικό.
Identifier extension bit (IDE)	1	Πρέπει να είναι μη σημαντικό bit (1). Το συγκεκριμένο bit είναι προαιρετικό.
Identifier B	18	Δεύτερο σκέλος του μοναδικού ID για τα δεδομένα. Αντιπροσωπεύει επίσης και την προτεραιότητα του μηνύματος.
Remote transmission request (RTR)	1	Σημαντικό bit (0).
Reserved bits (r0, r1)	2	Δεσμευμένο bit (θα πρέπει να ρυθμιστεί σε σημαντικό (0), αλλά γίνεται δεκτό είτε ως σημαντικό είτε ως μη σημαντικό).
Data length code (DLC)*	4	Αριθμός των bytes των

		δεδομένων (0-8 bytes)
Data field	0–64 (0-8 bytes)	Τα προς αποστολή δεδομένα (μήκος σε bytes που υπαγορεύονται από τον τομέα DLC)
CRC	15	Κυκλικός έλεγχος (Cyclic Redundancy Check)
CRC delimiter	1	Μη σημαντικό bit (1)
ACK slot	1	Ο πομπός στέλνει ένα μη σημαντικό bit (1) και κάθε δέκτης μπορεί να πάρει τη θέση του στέλλοντας ένα σημαντικό bit (0).
ACK delimiter	1	Μη σημαντικό bit (1)
End-of-frame (EOF)	7	Μη σημαντικό bit (1)

Πίνακας 5. Εκτεταμένη μορφή πλαισίου.

#### 2.10.4 Απομακρυσμένο Πλαίσιο

- Γενικά η μετάδοση δεδομένων γίνεται σε αυτόνομη βάση, με τον κόμβο πηγής δεδομένων (π.χ., έναν αισθητήρα) να στέλνει ένα πλαίσιο δεδομένων. Είναι επίσης δυνατό για έναν κόμβο προορισμού να ζητήσει τα δεδομένα από την πηγή με την αποστολή ενός απομακρυσμένου πλαισίου.
- Υπάρχουν δύο διαφορές ανάμεσα σε ένα πλαίσιο δεδομένων και ένα απομακρυσμένο πλαίσιο:

i) Το RTR-bit μεταδίδεται ως κυρίαρχο κομμάτι του πλαισίου δεδομένων.

ii) Στο απομακρυσμένο πλαίσιο δεν υπάρχει πεδίο δεδομένων.

δηλαδή,

RTR = 0 υποδηλώνει σημαντικό bit στο πλαίσιο δεδομένων

RTR = 1 υποδηλώνει μη σημαντικό bit στο απομακρυσμένο πλαίσιο

Στην πολύ απίθανη περίπτωση που ένα πλαίσιο δεδομένων και ένα απομακρυσμένο πλαίσιο με το

ίδιο ID μεταδίδονται ταυτόχρονα, θα προηγηθεί το πλαίσιο δεδομένων γιατί έχει RTR=0 (σημαντικό bit) μετά το ID. Με τον τρόπο αυτό, ο κόμβος που μεταδίδει το απομακρυσμένο πλαίσιο λαμβάνει τα επιθυμητά δεδομένα άμεσα [9].

### 2.10.5 Πλαίσιο Σφάλματος

Το πλαίσιο σφάλματος αποτελείται από δύο διαφορετικά πεδία:

- Το πρώτο πεδίο δίνεται από την χρησιμοποίηση των ERROR FLAG (6-12 σημαντικά / μη σημαντικά bits).
- Το δεύτερο πεδίο είναι το ERROR DELIMITER (8 μη σημαντικά bits).

Υπάρχουν δύο τύποι σημαιών λάθους:

- Η ενεργή σημαία σφάλματος. Για παράδειγμα στέλνονται 6 σημαντικά bit, τα οποία διαβιβάζονται από ένα κόμβο που είναι σε κατάσταση σφάλματος.
- Η παθητική σημαία σφάλματος. Για παράδειγμα στέλνονται 6 μη σημαντικά, τα οποία bit διαβιβάζονται σε ένα κόμβο που ανίχνευει σφάλμα στο δίκτυο [9].

### 2.10.6 Πλαίσιο Υπερφόρτωσης

Το πλαίσιο υπερφόρτωσης περιέχει δύο bit υπερφόρτωσης, την υπερφόρτωση σημαίας και την υπερφόρτωση delimiter.

Υπάρχουν δύο είδη συνθηκών υπερφόρτωσης που μπορεί να οδηγήσουν στη μετάδοση της σημαίας υπερφόρτωσης:

- Οι εσωτερικές συνθήκες του δέκτη, οι οποίες απαιτούν μια καθυστέρηση του επόμενου πλαισίου δεδομένων ή του απομακρυσμένου πλαισίου.
- Η ανίχνευση του σημαντικού bit κατά τη διάρκεια της διακοπής.

Η έναρξη ενός υπερφορτωμένου πλαισίου στην πρώτη περίπτωση επιτρέπεται μόνο για να ξεκινήσει την πρώτη φορά μετά από μία μη αναμενόμενη διακοπή, ενώ τα πλαίσια υπερφόρτωσης στη δεύτερη περίπτωση ξεκινούν αφού εντοπίσουν το σημαντικό bit. Η υπερφόρτωση σημαίας αποτελείται από 6 σημαντικά bit. Η υπερφόρτωση delimiter αποτελείται από 8 μη σημαντικά bit [9].

### 2.10.7 Διαπλαισιακή Απόσταση

Τα πλαίσια δεδομένων και τα απομακρυσμένα πλαίσια χωρίζονται από τα προηγούμενα πλαίσια



από ένα σύνολο bit που ονομάζεται διαπλαισιακή απόσταση (interframe space). Στα πλαίσια υπερφόρτωσης και στα πλαίσια σφάλματος δεν προηγούνται bit διαπλαισιακής απόστασης. Επίσης τα πολλαπλά πλαίσια υπερφόρτωσης δεν διαχωρίζονται από τέτοια bit. Η διαπλαισιακή απόσταση περιέχει bit για τη διακοπή πεδίου (fields intermission), για την αδράνεια δικτύου (bus idle) και για τους σταθμούς με το παθητικό σφάλμα αναστολής μετάδοσης (suspend transmission). Η διαπλαισιακή απόσταση αποτελείται από τρία τουλάχιστον μη σημαντικά (1) bits [9].

### 2.10.8 BIT Γέμισης

Στα πλαίσια CAN μετά από πέντε διαδοχικά bit της ίδιας πολικότητας εισάγεται ένα bit αντίθετης πολικότητας. Η πρακτική αυτή ονομάζεται bit γέμισης και οφείλεται στην υιοθέτηση της non return to zero (NRZ) κωδικοποίησης. Τα “γεμισμένα” αυτά πλαίσια δεδομένων “αδειάζονται” από τον δέκτη. Κατά τη χρησιμοποίηση του bit γέμισης, αν παρουσιαστούν έξι συνεχόμενα ψηφία του ίδιου τύπου (111.111 ή 000.000) θεωρείται σφάλμα [9].

## 2.11 Πρότυπα

Υπάρχουν αρκετά πρότυπα φυσικού στρώματος για δίκτυα CAN:

- **ISO 11898-1:** CAN Data Link Layer and Physical Signalling [30].
- **ISO 11898-2:** CAN High-Speed Medium Access Unit [31].
- **ISO 11898-3:** CAN Low-Speed, Fault-Tolerant, Medium-Dependent Interface [32].
- **ISO 11898-4:** CAN Time-Triggered Communication [33].
- **ISO 11898-5:** CAN High-Speed Medium Access Unit with Low-Power Mode [34].
- **ISO 11898-6:** CAN High-speed medium access unit with selective wake-up functionality [35].
- **ISO 11992-1:** CAN fault-tolerant for truck/trailer communication [36].
- **ISO 11783-2:** 250 kbit/s, Agricultural Standard [37].
- **SAE J1939-11:** 250 kbit/s, Shielded Twisted Pair (STP) [38].
- **SAE J1939-15:** 250 kbit/s, Unshielded Twisted Pair (UTP) (reduced layer) [39].
- **SAE J2411:** Single-wire CAN (SWC) [40].
- **ISO 11898-2:** Uses a two-wire balanced signalling scheme. It is the most used physical layer in car powertrain applications and industrial control networks [41].
- **ISO 11898-4:** Defines the time-triggered communication on CAN (TTCAN). It is based on the CAN data link layer protocol providing a system clock for the scheduling of messages [42].
- **SAE J1939:** Uses a two-wire twisted pair, -11 has a shield around the pair while -15 does not. SAE 1939 is widely used in heavy-duty (truck) and autobus industry as well as in agricultural & construction equipment [43].
- **ISO 11783-2:** Uses four unshielded twisted wires; two for CAN and two for terminating bias circuit (TBC) power and ground. This bus is used on agricultural tractors. This bus is intended to provide interconnectivity with any implementation adhering to the standard [44].

## **2.12 Εφαρμογές Υψηλότερων Στρωμάτων**

Καθώς το πρότυπο CAN δεν περιλαμβάνει τα καθήκοντα των πρωτοκόλλων επιπέδου εφαρμογής, όπως τον έλεγχο ροής δεδομένων, τη διευθυνσιοδότηση συσκευών, τη μεταφορά μπλοκ δεδομένων μεγαλύτερων από ένα μήνυμα και πάνω από όλα τα δεδομένα εφαρμογής. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκαν πολλές εφαρμογές των υψηλότερων πρωτοκόλλων στρώματος. Αρκετές είναι τυποποιημένες για ένα επιχειρηματικό τομέα, αν και όλες μπορούν να επεκταθούν από κάθε κατασκευαστή. Για παράδειγμα, στα επιβατικά αυτοκίνητα, κάθε κατασκευαστής έχει το δικό του πρότυπο [8], [11].

Ανάμεσα σε αυτές τις εφαρμογές είναι:

- ARINC825(for the aviation industry) [45], [46]
- CANaerospace (for the aviation industry) [47]
- CAN Kingdom [48]
- CANopen (used for industrial automation) [49], [50]
- CCP / XCP [51], [52]
- DeviceNet (used for industrial automation) [53], [54], [55], [56], [57]
- EnergyBus (used for electrical vehicles) [58]
- GMLAN (for General Motors) [59]
- ISO 15765-4 [60]
- ISO 11783 or ISOBUS (agriculture) [61]
- ISO 14229 [62]
- SAE J1939 (heavy road vehicles) [63]
- MilCAN [64], [65], [66]
- NMEA 2000 (marine industry) [67]
- RV-C (used for recreational vehicles) [68]
- SafetyBUS p (used for industrial automation) [69]
- SmartCraft [70], [71]
- Smart Distributed System (SDS) [72]
- VHCP (used for building automation)

### **2.13 Ασφάλεια**

Το CAN είναι ένα χαμηλού επιπέδου πρωτόκολλο και δεν υποστηρίζει εγγενώς τα χαρακτηριστικά ασφαλείας. Οι εφαρμογές αναπτύσσουν τους δικούς τους μηχανισμούς ασφαλείας, όπως για τον αμοιβαίο έλεγχο ταυτότητας. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, αν κάποιος εισάγει μηνύματα στο δίκτυο μπορεί να προκαλέσει διάφορα είδη επιθέσεων. Μηχανισμοί με κωδικούς υπάρχουν για τη μεταφορά δεδομένων που μπορούν να τροποποιήσουν το λογισμικό της μονάδας ελέγχου, όπως τη λήψη λογισμικού ή την τοποθέτηση κωδικών ασφαλείας, πράγμα το οποίο δεν συνήθίζεται στην απλή επικοινωνία.

### 3 Συνεργασία του IP με το CAN

Αποκλειστικά προορισμένες, μη τυποποιημένες πλατφόρμες και περιβάλλοντα λογισμικού απαιτούν να αναπτύξουν λύσεις ενδιάμεσου λογισμικού σε κατανεμημένα ετερογενή συστήματα. Προκειμένου να καλυφθεί αυτή η ετερογένεια και να επιτευχθεί η απαιτούμενη διαλειτουργικότητα, το ενδιάμεσο λογισμικό πρέπει να παρέχει αλληλεπίδραση μεταξύ των τεχνολογιών επικοινωνίας που κρύβονται πίσω από την κοινή διεπαφή υπηρεσίας. Το Internet Protocol (IP), έχει αποδειχθεί ότι είναι ένας υψηλού επιπέδου φορέας πληροφοριών που μπορεί να χρησιμεύσει ως μια τέτοια υπηρεσία. Αφού το IP κωδικοποιηθεί για διάφορες δικτυακές τεχνολογίες, επιτρέπει την πρόσβαση στο Internet των συνδεδεμένων συσκευών και χρησιμεύει ως βάση για πολλές προσεγγίσεις ενδιάμεσου λογισμικού. Οι συγκλίνουσες τάσεις μεταξύ του κόσμου του IP και των αυτοκινητοβιομηχανιών, των εργοστασίων και των εφαρμογών αυτοματισμού απαιτούν την προσαρμογή του IP στα δίκτυα Controller Area Network (CAN). Δεδομένου ότι οι απαιτήσεις για την μετάδοση πακέτων, όπως επιβάλλονται από το πρωτόκολλο IP, ξεχωρίζουν σημαντικά από τους μηχανισμούς μετάδοσης δεδομένων παρακάτω θα αναλυθούν οι δυσκολίες κατά τη διαδικασία της επικοινωνίας IP και CAN δικτύων και θα παρουσιάσει μια νέα και αποτελεσματική προσέγγιση για τη μετάδοση πακέτων IP μέσω CANbus [1],[5].

#### 3.1 Εισαγωγή και περιγραφή του προβλήματος

Το CANbus χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας βασισμένο στο μήνυμα που επιτρέπει την επικοινωνία εκπομπής. Τα μηνύματα αναγνωρίζονται μέσα από μία μοναδική εκτεταμένη κεφαλίδα των 29-bit που χρησιμεύει ως ένα αναγνωριστικό μηνύματος και προσδιορίζει ταυτόχρονα το περιεχόμενο και την προτεραιότητα του μηνύματος. Η προτεραιότητα του μηνύματος απαιτεί την ντετερμινιστική λογική επεξεργασία διαιτησίας CSMA/CA. Σε περίπτωση πολλαπλών ταυτόχρονων φορέων αποστολής, οι συσκευές λήψης απαιτούν την περιγραφή του περιεχομένου του μηνύματος για φιλτράρισμα. Ομοίως και στην μετάδοση CAN όταν πραγματοποιείται λειτουργία εκπομπής σε κάθε κόμβο του υποδικτύου, το δίκτυο φιλτράρει τα μηνύματα σύμφωνα με την περιγραφή και το περιεχόμενό τους. Ο ντετερμινιστικός μηχανισμός διαιτησίας κάνει το δίκτυο CANbus ικανό να λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο. Το πρωτόκολλο CAN (2.0B) επιτρέπει να σταλθεί μία μέγιστη μονάδα μετάδοσης (Maximum Transmission Unit) 8 bytes δεδομένων του ωφέλιμου φορτίου με ένα μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της τάξης του 1 Mbit/s.

Το IP είναι μέρος των TCP / IP πρωτοκόλλων που επιτρέπει στις συνεργαζόμενες συσκευές να

μοιράζονται τους πόρους μέσω δικτύου. Εδρεύει πάνω από το πρωτόκολλο CAN στο επίπεδο δικτύου του προτύπου OSI. Σε αντίθεση με το CAN που είναι προσανατολισμένο στο μήνυμα, το IP είναι προσανατολισμένο στις συνδέσεις και στις οντότητες του δικτύου που προσδιορίζονται μέσα από μία μοναδική διεύθυνση IP των 4 byte που επιτρέπει την ένα προς ένα επικοινωνία ή την πολυεκπομπή μέσω των αντίστοιχων δρομολογητών που το υποστηρίζουν. Σε αντίθεση με το CAN που επικοινωνεί συνήθως με χαμηλού μεγέθους μηνύματα ελέγχου, το IP έχει στόχο τη μετάδοση δεδομένων υψηλού ρυθμού που επιτυγχάνεται συνήθως μέσω του FTP ή στη μεταφορά δεδομένων πολυμέσων. Η MTU των πακέτων IP ανέρχεται σε 1500 bytes όπου οι κεφαλίδες των πακέτων IP έχουν μέγεθος 12 bytes, συνθέτοντας έτσι πρόσθετη επιβάρυνση σε σχέση με την εκτεταμένη 29-bit κεφαλίδα του CAN. Στην τρέχουσα πιο διαδεδομένη εκδοχή του IPv4 δεν υποστηρίζεται η ανάθεση προτεραιότητας στα μηνύματα και η διαιτησία Ethernet CSMA/CD αποφασίζει για τον πραγματικό χρόνο μετάδοσης.

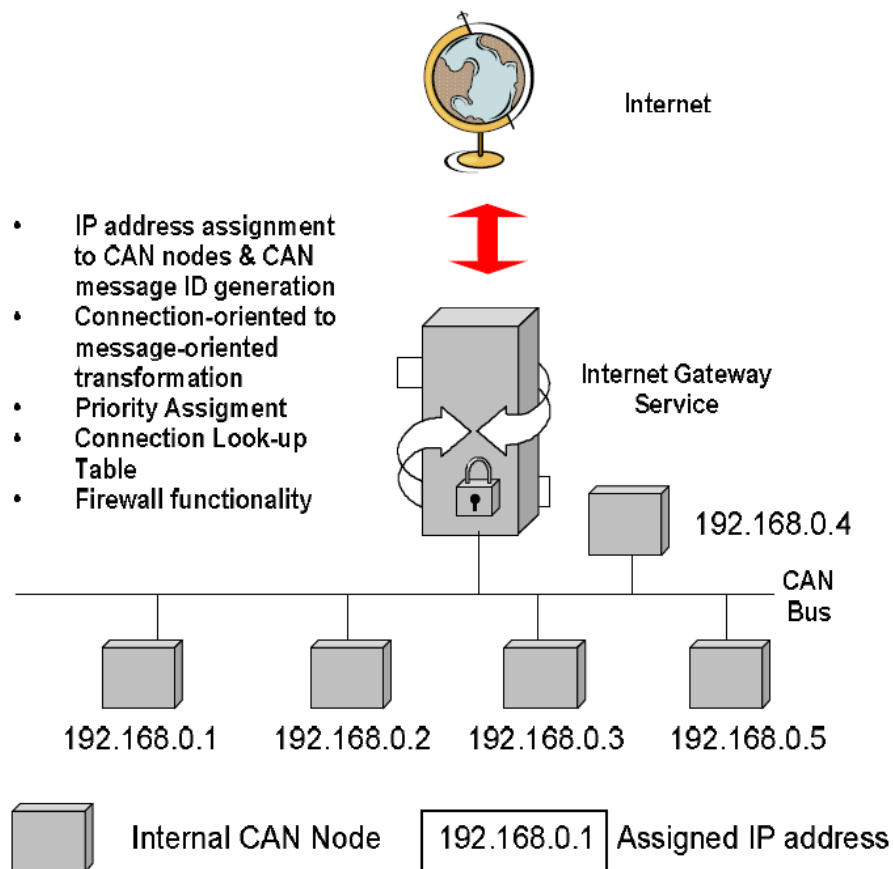
Ως εκ τούτου, η εισαγωγή πακέτων IP με το πρωτόκολλο CAN επιβάλλει τις τέσσερις ακόλουθες προκλήσεις:

- Προσαρμογή της προσανατολισμένης στη σύνδεση IP επικοινωνία στην προσανατολισμένη στο μήνυμα επικοινωνία CAN.
- Ανάθεση προτεραιότητας πακέτων IP σε πραγματικό χρόνο για να ταιριάζουν στους CAN μηχανισμούς διαιτησίας.
- Αναδιαμόρφωση των μεγάλων πακέτων δεδομένων IP για να ταιριάζουν με τα αντίστοιχα MTU CAN πακέτα.
- Μείωση της IP κεφαλίδας για πιο αποτελεσματική χρήση των πόρων [2].

### **3.2 IP πάνω σε CAN**

Στην παρακάτω ενότητα περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο τα πακέτα IP αντιστοιχίζονται σε μηνύματα CAN για τη μετάδοση μέσω του δικτύου CAN. Αυτό το πετυχαίνουμε με την οικοδόμηση των υπηρεσιών διαδικτυακής πύλης (Internet Gateway Service) εφαρμοσμένων σε έναν κόμβο CAN στο δίκτυο. Η IGS αντιμετωπίζει τις τέσσερις προκλήσεις που προσδιορίζονται στο παραπάνω κεφάλαιο.

### 3.3 Internet Gateway Service (IGS)



Εικόνα 4. Η πύλη Εφαρμογών Διαδικτύου (The Internet Application Gateway) [2].

Το IGS έχει αναπτυχθεί ως το κεντρικό τμήμα της νέας ολοκληρωμένης ενδιάμεσης υπηρεσίας CAN. Λαμβάνει και μεταδίδει εξωτερικά πακέτα IP και τα μετασχηματίζει σε συγκεκριμένα μηνύματα CAN τα οποία στη συνέχεια διαβιβάζονται στον αντίστοιχο κόμβο CAN. Σε αντίθεση με άλλες προσεγγίσεις, η IGS μετατρέπει την επικεφαλίδα του IP πακέτου έτσι ώστε το πακέτο IP να μπορεί να είναι πλήρως συναρμολογούμενο στην εκ νέου λήψη στον κόμβο CAN.

Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για να εκτελούνται εφαρμογές IP σε κόμβους CAN, π.χ. απομακρυσμένες διαγνωστικές υπηρεσίες βασισμένες στο διαδίκτυο ή το «ανέβασμα» λογισμικού. Ωστόσο, εφαρμόζοντας την IGS σε άλλους κόμβους CAN στο δίκτυο επιτρέπει σε αυτούς τους κόμβους την ανταλλαγή πακέτων IP εσωτερικά. Η IGS είναι επίσης υπεύθυνη για την θωράκιση του εσωτερικού δικτύου CAN από τον ετερογενή κόσμο του Internet. Ως εκ τούτου, μπορεί επίσης να στηρίζει τη λειτουργία του τείχους προστασίας για την προστασία του δικτύου CAN από

κακόβουλες εφαρμογές. Η IGS θα πρέπει να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις που επισημαίνονται για να παρέχει κατάλληλη μετατροπή πακέτων IP. Στην εικόνα 4 φαίνεται πως η IGS προσαρμόζεται στο CAN δίκτυο.

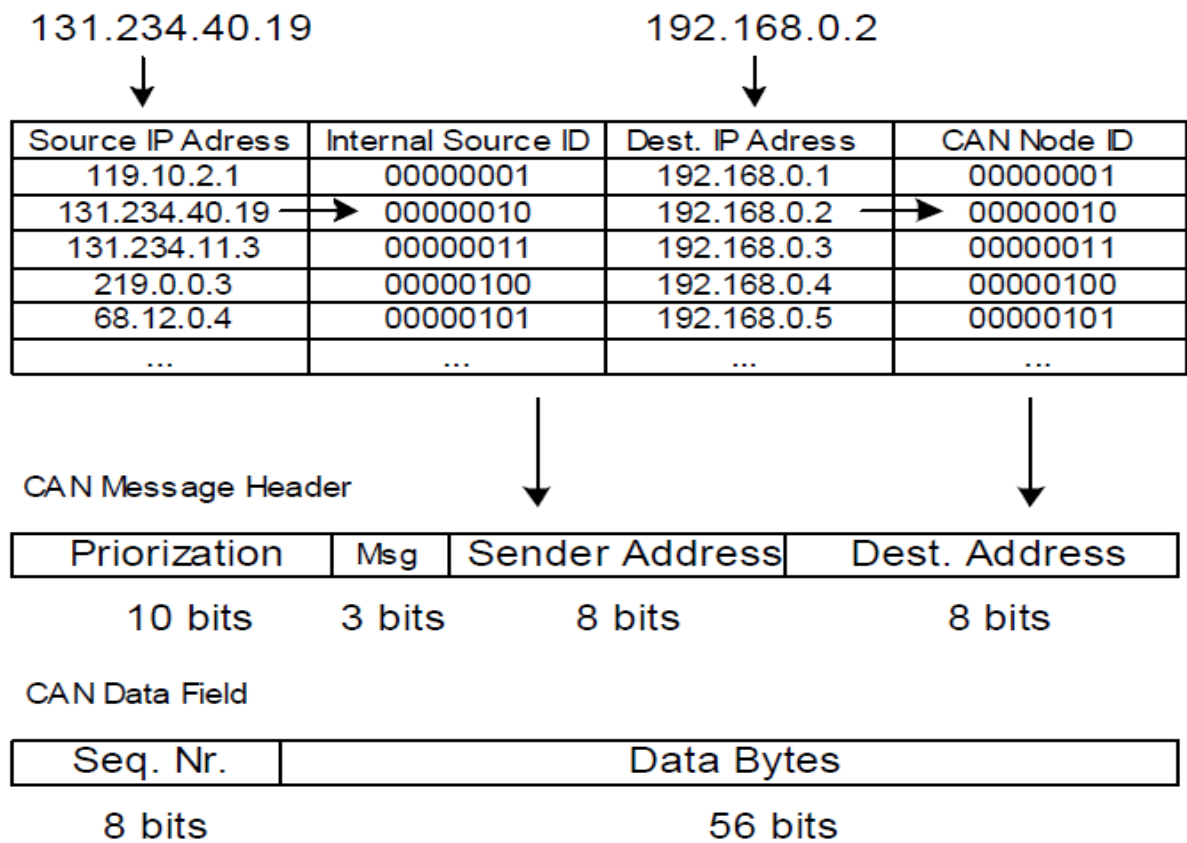
### ***3.4 Μετατρέποντας την προσανατολισμένη στη σύνδεση επικοινωνία στην προσανατολισμένη στο μήνυμα επικοινωνία***

Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4, η IGS θα πρέπει να μετατρέψει τους προσανατολισμένους στη σύνδεση μηχανισμούς παράδοσης των IP πακέτων έτσι ώστε να ταιριάζουν τους προσανατολισμένους στο μήνυμα μηχανισμούς που αναπτύσσονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του CAN 2.0B.

Προκειμένου να επιτευχθεί σύνδεση με προσανατολισμό την επικοινωνία στο CAN, λογικά θα πρέπει να καταχωρηθεί σε κάθε κόμβο CAN μια διεύθυνση IP.

Υποθέτουμε ότι αυτό μπορεί να γίνει είτε στατικά είτε δυναμικά από την πύλη εφαρμογής χρησιμοποιώντας την κατάλληλη έκδοση του πρωτοκόλλου DHCP. Ωστόσο, το δίκτυο CAN έχει ένα θεωρητικό όριο της τάξης των 128 κόμβων, έτσι χρησιμοποιούμε τα τελευταία 8 bits της διεύθυνσης IP μεγέθους 4 byte για να προσδιορίσουμε ένα συγκεκριμένο κόμβο CAN [3]. Αυτό γίνεται με σκοπό αυτός ο συγκεκριμένος κόμβος να λαμβάνει πακέτα IP που προορίζονται μόνο για εκείνον. Το φίλτρο μηνύματος του συγκεκριμένου κόμβου είναι ότι δέχεται μηνύματα με ID που περιέχουν τα 8 bit του ID του. Οι άλλοι κόμβοι που δεν έχουν στα φίλτρα τους αυτή την αναγνώριση θα απορρίψουν αυτό το μήνυμα, με αποτέλεσμα την αποκλειστική επικοινωνία από σημείο σε σημείο, όπως απαιτείται από το πρωτόκολλο IP.





Πίνακας 6. Μορφή δεδομένων CAN για μετάδοση IP.

Προκειμένου να επιτρέψει η διαδικτυακή πύλη να περνούν τα μηνύματα στο δέκτη, ο μετασχηματισμός των διευθύνσεων πρέπει να αποθηκεύεται επίσης σε έναν αντίστοιχο πίνακα σύνδεσης στην IGS, όπως φαίνεται στον πίνακα 6. Κατά τη λήψη ενός πακέτου, η IGS αφαιρεί το τελευταίο byte του προορισμού της IP και προσδιορίζει τον κόμβο CAN μέσω του αντίστοιχου πίνακα. Παρομοίως, η αρχική διεύθυνση IP αποθηκεύεται στον πίνακα και αντιστοιχίζεται σε έναν εσωτερικό αριθμό ταυτοποίησης που κυμαίνεται από το 128 έως το 255. Οι πρώτοι 128 ακέραιοι προορίζονται για εσωτερικούς σκοπούς επικοινωνίας του CAN δικτύου.

Στη συνέχεια, η IGS μετατρέπει την κεφαλίδα IP του πακέτου και το περιεχόμενο σε μια σειρά από CAN μηνύματα που μπορούν να γίνουν δεκτά μόνο από τον αντίστοιχο κόμβο CAN. Ως εκ τούτου, η IGS δημιουργεί ένα νέο ID μηνύματος μεγέθους 29 bit, όπου το μεγέθους 8 bit ID χτίζει το τελευταίο μέρος του ID μηνύματος. Αυτό το τμήμα του μηνύματος προηγείται, επιτρέποντας στον δέκτη να προσδιορίσει μοναδικά τον αποστολέα του μηνύματος. Διατηρούμε επιπλέον 3 bit χώρο μηνύματος για να μεταδωθούν τα ενδιάμεσα συγκεκριμένα μηνύματα, π.χ. μηνύματα για κόμβο

αρχικοποίησης ή μηνύματα DHCP. Επιπλέον, η IGS επιτρέπει να οριστεί ένας πρωταρχικός κωδικός στο μήνυμα ο οποίος δημιουργείται θέτοντας τα πρώτα 10 bits του μηνύματος CAN ID αναλόγως. Στο CAN, η προτεραιότητα ενός μηνύματος προέρχεται από τα πρώτα bit της ταυτότητας (ID) στην κεφαλίδα του μηνύματος. Οι κόμβοι αρχίζουν να μεταδίδουν τις κεφαλίδες τους στο δίκτυο. Η μετάδοση διακόπτεται όταν εντοπίζεται στο δίκτυο ένα κυρίαρχο bit, δείχνοντας ότι ένα ID με υψηλότερη προτεραιότητα μεταδίδεται κάπου αλλού. Ομοίως, θέτοντας τα πρώτα bit του ID του μηνύματος επιτρέπει την προτεραιότητα του μηνύματος. Ωστόσο καθώς έχει ήδη προκαθοριστεί, όπως μία σημαντική ποσότητα των κεφαλίδων του μηνύματος ID στις αιτήσεις των αντίστοιχων τομέων, τα αντίστοιχα bit που αντιπροσωπεύουν ένα επίπεδο προτεραιότητας πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά. Η πρωταρχικότητα επιτρέπει να προστεθεί περιορισμένη σε πραγματικό χρόνο υποστήριξη για την εσωτερική μετάδοση των μηνυμάτων IP. Ως εκ τούτου, η IGS μπορεί να αναθέσει υψηλότερες προτεραιότητες στα μηνύματα που απαιτούνται για τον έλεγχο των συσκευών από ότι για τα πολυμέσα.

Δεδομένου ότι η MTU του πεδίου δεδομένων μπορεί να ανέλθει έως τα 1500 bytes, κάθε πακέτο IP πρέπει να είναι κατακερματισμένο, όπως ταιριάζει στο CAN MTU. Ως εκ τούτου, διαμορφώνονται IP πακέτα των 7 bytes για τα CAN μηνύματα. Με μέγιστη ποσότητα τα 215 μηνύματα CAN πρέπει να διαβιβάζονται τα πλήρη IP πακέτα δεδομένων, τα υπόλοιπα 8 bits δεδομένων στον τομέα CAN προορίζονται για τους αριθμούς αλληλουχίας (sequencing numbers). Οι αριθμοί αλληλουχίας απαιτούνται για να συναρμολογηθούν τα IP πακέτα στο δέκτη. Αυτό είναι απαραίτητο για να κωδικοποιηθεί η πλήρης κεφαλίδα του πακέτου IP. Ωστόσο, καθώς πολλές πληροφορίες κεφαλίδας IP παραμελούνται και καθορίζονται κυρίως για σκοπούς δρομολόγησης, η κεφαλίδα πρέπει να συμπιέζεται περαιτέρω, ώστε να μειωθεί η επιβάρυνση των πληροφοριών και έτσι να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα. Ο παραπάνω πίνακας δείχνει τη νέα μορφή δεδομένων για την μετάδοση IP. Δεδομένης αυτής της προσέγγισης, ο δέκτης μπορεί να εντοπίσει τα μηνύματα που προορίζονται για αυτόν ανάλογα με το ID του μηνύματος και να ανοικοδομήσει τα πλήρη πακέτα IP αξιοποιώντας τους μηχανισμούς αλληλουχίας και τις πληροφορίες της κεφαλίδας IP που διαβιβάζονται εντός του ωφέλιμου φορτίου των δεδομένων [6].

## 4 Εφαρμογές CAN σε οχήματα

### 4.1 Το CANbus στην αυτοκινητοβιομηχανία

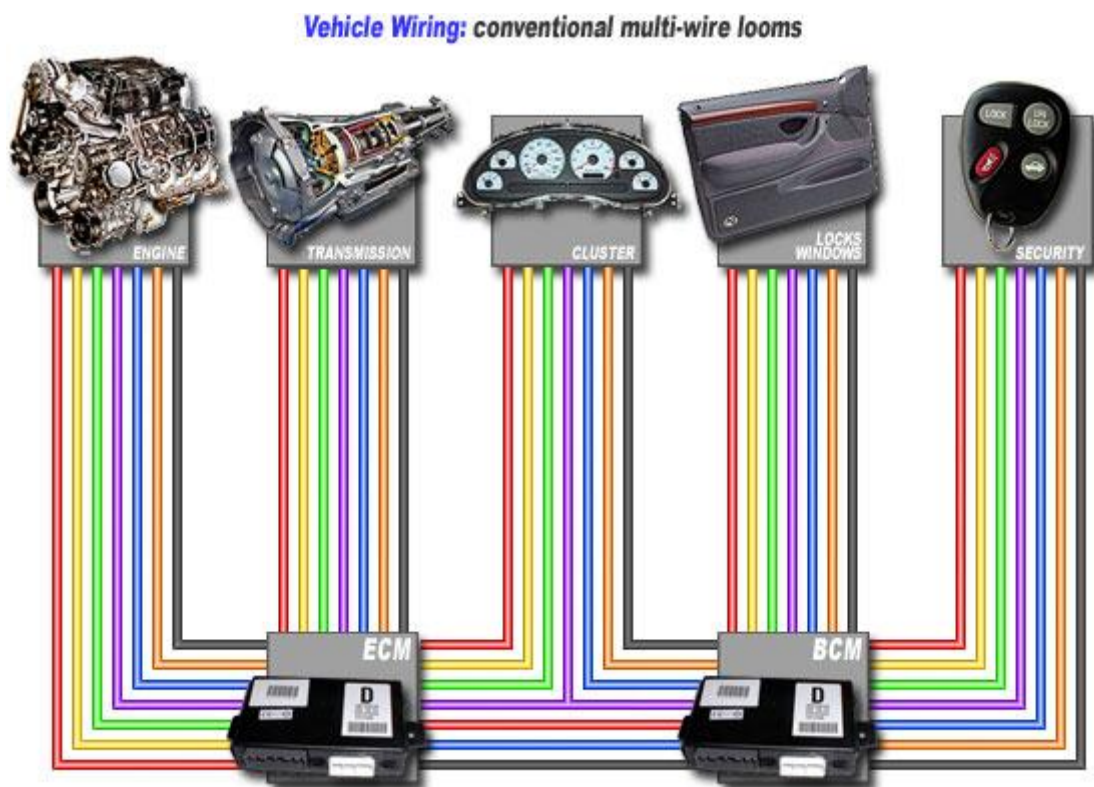
Ένα μοντέρνο αυτοκίνητο έχει περίπου 70 ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου για τα διάφορα υποσυστήματά του. Συνήθως ο μεγαλύτερος επεξεργαστής είναι η μονάδα ελέγχου του κινητήρα. Μερικοί άλλοι είναι που χρησιμοποιούνται για τη διαβίβαση, τους αερόσακους, το antispin control / ABS, το cruise control, το ηλεκτρικά υποβοηθούμενο τιμόνι / EPS, τα συστήματα ήχου, τα παράθυρα, τις πόρτες, τη ρύθμιση καθρέπτη, τη μπαταρία και την επαναφόρτιση συστημάτων για υβριδικά / ηλεκτρικά αυτοκίνητα, κλπ. Μερικά από αυτά τα υποσυστήματα λειτουργούν αυτόνομα, σε μερικά άλλα όμως η επικοινωνία με άλλα συστήματα είναι ουσιαστικής σημασίας. Ένα υποσύστημα μπορεί να χρειαστεί να ελέγξει ενεργοποιητές ή να λάβει πληροφορίες από τους αισθητήρες. Το πρότυπο CAN επινοήθηκε για να καλύψει αυτή την ανάγκη.

Το CAN bus μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα όχημα για τη διασύνδεση της μονάδας ελέγχου του κινητήρα και με τη μετάδοση του αυτοκινήτου ή σε ένα διαφορετικό δίκτυο για να συνδέσει τις κλειδαριές στις πόρτες, με τον έλεγχο του κλίματος κτλ.

Η εταιρεία Bosch κατέχει διπλώματα ευρεσιτεχνίας σχετικά με αυτή την τεχνολογία, και οι κατασκευαστές των συμβατών με CAN εξαρτημάτων καταβάλλουν τέλη αδείας στη Bosch.

### 4.2 Πρίν απο την καθιέρωση του CANbus

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1940, οι αυτοκινητοβιομηχανίες βελτιώνουν την τεχνολογία στα οχήματά τους ενσωματώνοντας μια αυξανόμενη ποσότητα ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Καθώς η τεχνολογία προχωρούσε, τα οχήματα έγιναν πιο περίπλοκα με την αντικατάσταση μηχανικών συστημάτων απο ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την παροχή επιπλέον ανέσεων και νέων χαρακτηριστικών ασφαλείας. Μέχρι την υιοθέτηση του CANbus, τα οχήματα εξοπλίζονταν με τεράστιες ποσότητες καλωδίων τα οποία ήταν απαραίτητα για τη διασύνδεση όλων των διαφόρων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.



Εικόνα 5. Τυπική καλωδίωση αυτοκινήτου πριν απο την καθιέρωση του CANbus.

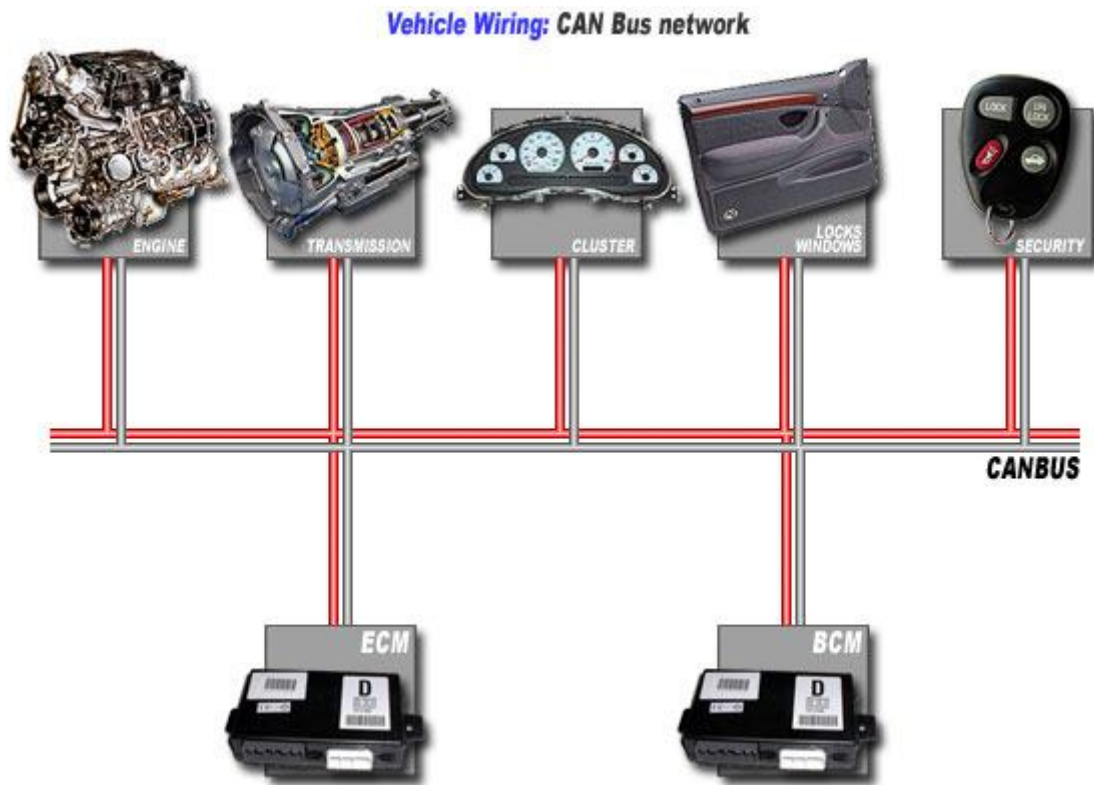
Λόγω του τεράστιου όγκου των καλωδίων, μια εγκατάσταση μετά την αγορά απαιτεί όχι μόνο την κατανόηση για το πώς επικοινωνούν μεταξύ τους τα ολοκληρωμένα συστήματα, αλλά επίσης απαιτεί και πολλές συνδέσεις που πρέπει να γίνουν σε όλο το όχημα. Για να κάτανοήσουμε το μέγεθος του προβλήματος αρκεί να σκεφτούμε οτι η καλωδίωση του οχήματος διαφέρει μεταξύ των κατασκευαστών, των μοντέλων ακόμα και των εκδόσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται οι εγκαταστάτες να έχουν εξειδικευμένες γνώσεις ακόμα και για το πιο ασήμαντο εξοπλισμό ή ο χρόνος που θα διαθέσουν για την εγκατάσταση (σε τιμή) να είναι πολλαπλάσιος της αξίας του εκάστοτε εξοπλισμού.



Εικόνα 6. Τυπική καλωδίωση συναγερμού αυτοκινήτου πριν απο την καθιέρωση του CANbus.

### 4.3 Μετά την καθιέρωση του CANbus

Η Mercedes-Benz κατασκεύασε το πρώτο όχημα με δίκτυο CANbus που εισήλθε στην αγορά το 1992. Η μείωση της καλωδίωσης έφτασε τα 2 χιλιόμετρα, το συνολικό βάρος του οχήματος μειώθηκε κατά 50 κιλά και χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα μισά από τα βύσματα που συνήθως χρησιμοποιούνταν. Για πρώτη φορά, τα συστήματα αισθητήρων του οχήματος ήταν σε θέση να επικοινωνούν μεταξύ τους σε πολύ υψηλές ταχύτητες (25kbps - 1Mbps) σε μία μονή ή διπλή γραμμή επικοινωνίας, σε αντίθεση με τα προηγούμενα πολλαπλών γραμμών συστήματα.

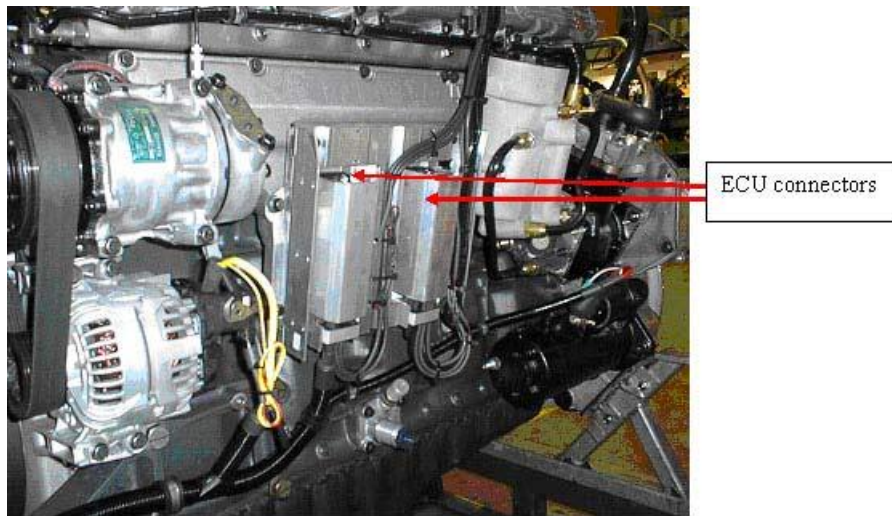


Εικόνα 7. Τυπική καλωδίωση CANbus σε αυτοκίνητο.

Το 2006, πάνω από το 70% του συνόλου των αυτοκινήτων που πωλούνται στη Βόρεια Αμερική χρησιμοποιεί την τεχνολογία CANbus. Ξεκινώντας το 2008, η Society of Automotive Engineers (SAE) απαιτεί το 100% των οχημάτων που πωλούνται στις ΗΠΑ να χρησιμοποιήσουν πρωτόκολλα επικοινωνίας CANbus, ενώ και η Ευρωπαϊκή Ένωση υιοθέτησε παρόμοιους νόμους.

Η εφαρμογή του CAN ξεκίνησε αρχικά από την αυτοκινητοβιομηχανία, αλλά επεκτάθηκε και σε άλλες βιομηχανίες όπως των φορτηγών, των πλοίων, των αεροπλάνων ακόμη και των διαστημοπλοίων.

Στην αυτοκινητοβιομηχανία ο ενσωματωμένος έλεγχος έχει επεκταθεί από τα αρχικά αυτόνομα συστήματα σε ολοκληρωμένα συστήματα ελέγχου με δυνατότητες δικτύωσης. Βάζοντας σε ένα δίκτυο ηλεκτρομηχανικά υποσυστήματα, καθίσταται δυνατό να διαμορφώνονται όχι μόνο λειτουργίες αλλά και το υλικό, πράγμα που διευκολύνει την επαναχρησιμοποίησή του και του προσθέτει παραπάνω δυνατότητες [12], [15], [16], [18].



Εικόνα 8. Μια Electronic Control Unit (ECU) τοποθετημένη σε ένα κινητήρα ντίζελ ενός φορτηγού Scania. Η ECU χειρίζεται τον έλεγχο του κινητήρα, turbo, ανεμιστήρα, κλπ., αλλά και την επικοινωνία CAN (Παραχώρηση της Scania AB).

## 5 Αρχιτεκτονικές

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται πέντε παραδείγματα οχημάτων με καταναμημένες αρχιτεκτονικές ελέγχου που βασίζεται στο CANbus. Οι αρχιτεκτονικές που αναλύονται αφορούν ένα επιβατικό αυτοκίνητο, ένα φορτηγό, ένα πλοίο, ένα διαστημικό σκάφος και ένα αεροσκάφος.

### 5.1 Επιβατικό αυτοκίνητο

Στην εικόνα 9 απεικονίζεται η καταναμημένη αρχιτεκτονική ελέγχου του επιβατικού αυτοκινήτου Volvo XC90. Τα μπλοκ αντιπροσωπεύουν τις ECU και οι γραμμές αντιπροσωπεύουν τα δίκτυα. Η πραγματική θέση της ECU στο αυτοκίνητο υποδεικνύεται από τη θέση της στο παρακάτω διάγραμμα. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες ECU: για τον κινητήρα και το σασί, για το κομμάτι των πληροφοριών και της ψυχαγωγίας (infotainment) και για τα ηλεκτρονικά του σώματος του αυτοκινήτου. Χρησιμοποιούνται πολλά δίκτυα για τη διασύνδεση των ECU με τα υποσυστήματα του αυτοκινήτου. Πολλά από τα ακρωνύμια των ECU ορίζονται στο παρακάτω σχήμα. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν δύο δίκτυα CANbus. Στο αριστερό CANbus δίκτυο στο διάγραμμα παρατηρούμε το CAN για τον κινητήρα και τα υποσυστήματα για το σασί. Το CANbus συνδέει για παράδειγμα τον κινητήρα με το σύστημα πέδησης (TCM, ECM, BCM, κλπ.) και έχει ένα ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 500 kbps. Το άλλο CANbus δίκτυο παρατηρούμε ότι συνδέει τα ηλεκτρονικά σώματος του αυτοκινήτου όπως για παράδειγμα την πόρτα και τον έλεγχο του κλίματος (DDM, PDM, CCM, κλπ.) και έχει ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 125 kbps. Η κεντρική ηλεκτρονική μονάδα (Central Electronic Module) είναι ένα ECU, που λειτουργεί ως πύλη μεταξύ των δύο CANbus δικτύων. Ένα δίκτυο προσανατολισμένο στα μέσα ψυχαγωγίας του αυτοκινήτου (Media Oriented System Transport) ορίζει τη μεταφορά δεδομένων στα υποσυστήματα ψυχαγωγίας και τηλεματικής του αυτοκινήτου. Συνδέεται συνεπώς στα κατάλληλα ECU που αφορούν τα πολυμέσα, το τηλέφωνο και την κεραία. Τέλος, τα τοπικά δίκτυα διασύνδεσης (Local Interconnect Networks) χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των slave κόμβων σε ένα υποσύστημα και απεικονίζονται με διακεκομμένες γραμμές στο παρακάτω διάγραμμα. Ο κατά προσέγγιση μέγιστος αριθμός ECU ανά όχημα είναι περίπου 40 [11], [15]. Σχηματικά τα παραπάνω περιγράφονται στην εικόνα 9.

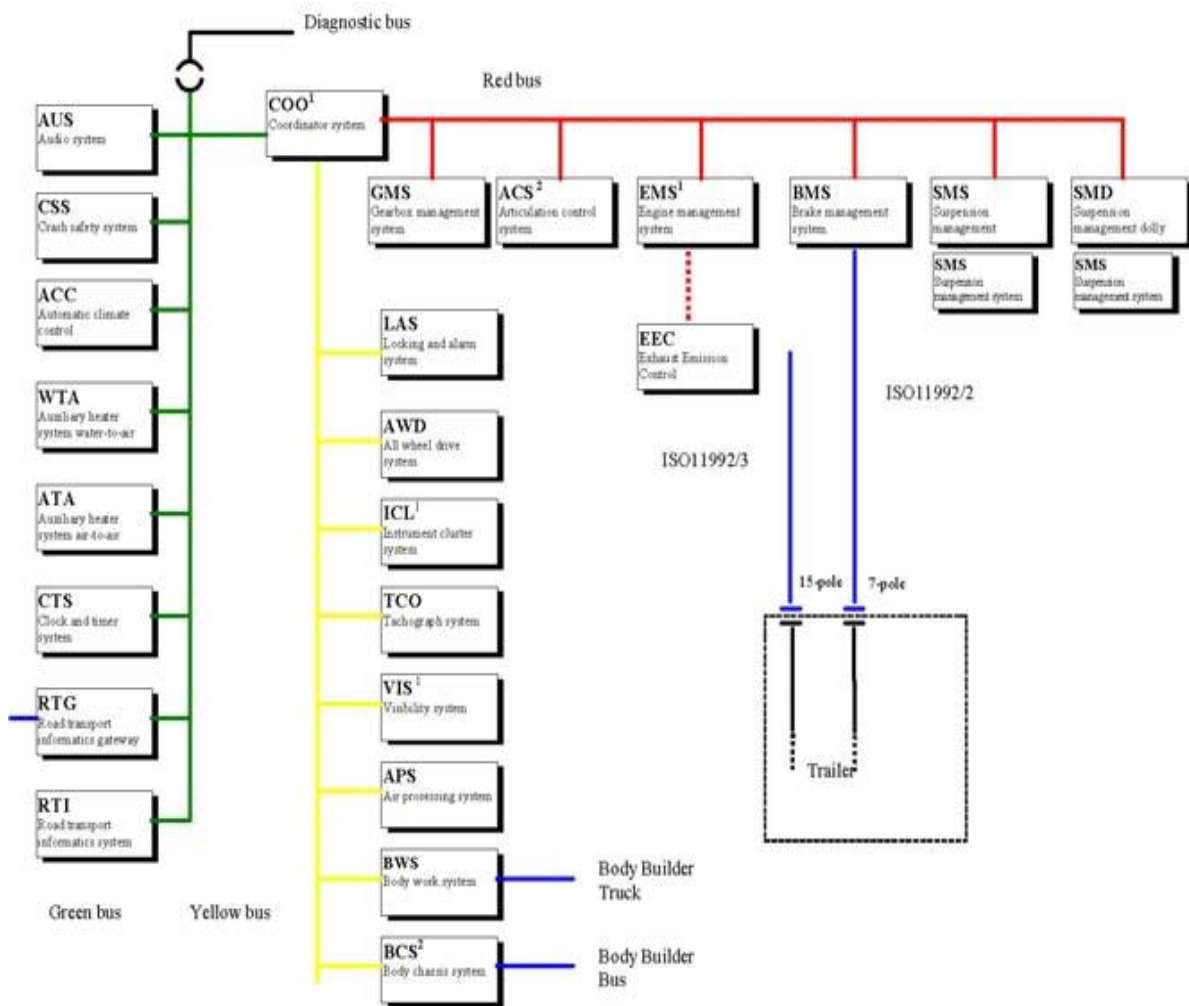




## **5.2 Φορτηγό αυτοκίνητο**

Υπάρχουν πολλές ομοιότητες μεταξύ της αρχιτεκτονικής ελέγχου σε επιβατικά αυτοκίνητα και σε φορτηγά αυτοκίνητα. Υπάρχουν επίσης πολλές σημαντικές διαφορές, ορισμένες από τις οποίες οφείλονται στο γεγονός ότι τα φορτηγά έχουν σχεδιαστεί για ένα μεγάλο αριθμό φυσικών παραλλαγών και έχουν μεγαλύτερους αναμενόμενους χρόνους ζωής. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιβάλλουν απαιτήσεις σχετικά με την ευελιξία σε σχέση με τη σύνδεση. Δηλαδή την πρόσθεση και αφαίρεση εξοπλισμού, ρυμουλκούμενου και μη.

Η αρχιτεκτονική ελέγχου για ένα φορτηγό αυτοκίνητο Scania φαίνεται στην εικόνα 10.



- Green bus**
- AUS Audio system
  - CSS Crash safety system
  - ACC Automatic climate control
  - WTA Auxiliary heater water-to-air
  - ATA Auxiliary heater air-to-air
  - CTS Clock and timer system
  - RTG Road transport info gateway
  - RTI Road transport info system

- Yellow bus**
- LAS Locking and alarm system
  - AWD All wheel drive system
  - ICL Instrument cluster system
  - TCO Tachograph system
  - VIS Visibility system
  - APS Air processing system
  - BWS Body work system
  - BCS Body chassis system

- Red bus**
- GMS Gearbox management system
  - ACS Articulation control system
  - EMS Engine management system
  - EEC Exhaust emission control
  - BMS Brake management system
  - SMS Suspension management system
  - SMD Suspension management dolly

COO Coordinator system

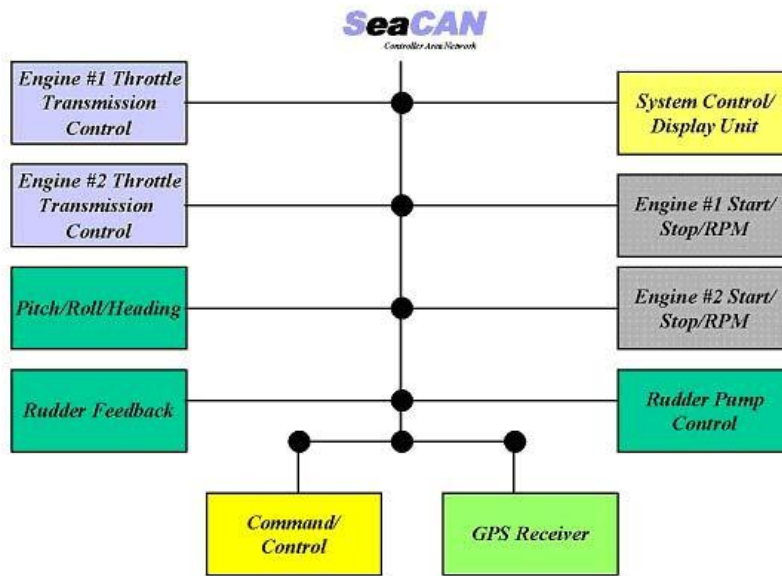
Εικόνα 10. Κατανομημένη αρχιτεκτονική ελέγχου για ένα φορτηγό Scania (Παραχώρηση της Scania AB).

Αποτελείται από τρία δίκτυα CANbus, συμβολισμένα με πράσινο, κίτρινο και κόκκινο χρώμα σύμφωνα με τη λειτουργία την οποία πραγματοποιούν. Το δίκτυο CANbus χρωματισμένο με πράσινο χρώμα περιέχει λιγότερο κρίσιμες για τη λειτουργία του φορτηγού αυτοκινήτου ECU που αφορούν το ηχοσύστημα και τον κλιματισμό. Το δίκτυο CANbus χρωματισμένο με κίτρινο χρώμα μπορεί να χειρίζεται την επικοινωνία για σημαντικά υποσυστήματα που δεν εμπλέκονται άμεσα στη διαχείριση του κινητήρα και των φρένων. Για παράδειγμα σε αυτό το δίκτυο είναι συνδεδεμένο το σύστημα του πίνακα οργάνων. Το δίκτυο CANbus χρωματισμένο με κόκκινο χρώμα μπορεί να χειρίζεται την επικοινωνία μεταξύ των πιο σημαντικών ECU που αφορούν τα υποσυστήματα μετάδοσης κίνησης του φορτηγού αυτοκινήτου. Ο συντονιστής του συστήματος ECU (COO) είναι μια πύλη μεταξύ των τριών CANbus δικτύων. Συνδεδεμένο με το CANbus που έχει την πράσινη σήμανση είναι ένα διαγνωστικό CAN, το οποίο χρησιμοποιείται για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση των ECU. Το διαγνωστικό διαύλου μπορεί έτσι να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων. Όπως και στα επιβατικά αυτοκίνητα, υπάρχουν επίσης υποδίκτυα, τα οποία δεν φαίνονται στο σχήμα. Το SAE J1939 είναι το κυρίαρχο υψηλότερου επιπέδου πρωτόκολλο για τα φορτηγά αυτοκίνητα. Προσφέρει plug-and-play λειτουργικότητα, αλλά κάνει δύσκολες τις αλλαγές του συστήματος και τη βελτιστοποίηση. Αυτό συμβαίνει επειδή οι προτεραιότητες για τον προγραμματισμό της κίνησης του δικτύου δεν μπορούν να αναδιαρθρωθούν. Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν τα κενά στο SAE J1939 για να επιλύσουν τα παραπάνω προβλήματα, αλλά και η ύπαρξή τους ακόμα δείχνει τις ελλείψεις που έχει το πρωτόκολλο [63].

### 5.3 Πλοιάριο ναυτικού ΗΠΑ

Υπάρχουν πολλές εφαρμογές στη ναυτιλία για το CAN. Εδώ δίνουμε ένα παράδειγμα για μη επανδρωμένα πλοία τα οποία χρησιμοποιούνται σαν θαλάσσιοι στόχοι από το Ναυτικό των ΗΠΑ. Το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ έχει αναπτύξει το SeaCAN, μια κατανεμημένη αρχιτεκτονική ηλεκτρονικών, το οποίο είναι εγκατεστημένο σε όλα τα πλοία-στόχους και έχει επίσης αναβαθμίσει ένα μεγάλο αριθμό παλιών τέτοιων πλοιαρίων. Μια αρχιτεκτονική SeaCAN για ένα τηλεχειριζόμενο φουσκωτό σκάφος απεικονίζεται στην εικόνα 11. Το σύστημα εφαρμόζει έναν αυτόματο πιλότο με βάση ένα κλειστό βρόχο ελέγχου ανάδρασης πάνω στο δίκτυο. Συνδέει τους κόμβους Rudder Feedback, Δέκτη GPS, Pitch/Roll /Heading, Command/Control και τους δύο κόμβους για την επιτάχυνση της μηχανής. Το σύστημα SeaCAN χρησιμοποιεί μερικές CPU με μικροελεγκτές Infineon C167 που συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός διαύλου CAN με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα 125 kbps. Ο χαμηλότερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων επιλέγεται έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να εγκατασταθούν καλώδια σε μεγαλύτερες αποστάσεις για πιο μεγάλα πλοία και πλοία.

Το σύστημα SeaCAN χρησιμοποιεί ένα λειτουργικό σύστημα χτισμένο γύρω από το CANbus και με βάση το πρωτόκολλο υψηλότερου στρώματος CAN Kingdom. Το λειτουργικό σύστημα περιέχει ένα χρονοπρογραμματιστή για εργασίες, ο οποίος είναι συγχρονισμένος με μία εφαρμογή παγκόσμιου ρολογιού υψηλότερων στρωμάτων. Έτσι μπορεί να συντονίζει τη συμπεριφορά μεταξύ δύο κόμβων, χωρίς καμία πρόσθετη επικοινωνία δικτύου. Αυτή η λειτουργικότητα χρησιμοποιείται για την παραγωγή περιοδικής δειγματοληψίας, π.χ. στο σερβοκινητήρα ελέγχου του πηδαλίου. Στην περίπτωση αυτή, ο κόμβος-αισθητήρας ανίχνευσης του πηδαλίου μετράει την γωνία του πηδαλίου με ένα ρυθμό 10Hz. Η υποδοχή των μηνυμάτων-δεδομένων από το πηδάλιο ανιχνεύσεως κόμβου στον ελεγκτή-ενεργοποιητή πηδαλίου ενεργοποιεί τη ρουτίνα ελέγχου. Επειδή αυτά τα μηνύματα έχουν υψηλή προτεραιότητα στο δίκτυο και είναι χρονισμένα με ένα γνωστό ρυθμό μετάδοσης, η μεταβλητότητα του βρόχου ελέγχου και η καθυστέρηση των δεδομένων είναι πολύ χαμηλή, το οποίο επιτρέπει καλές επιδόσεις στο βρόχο ελέγχου [48]. Στην εικόνα 11 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ελέγχου για ένα πλοίαριο.

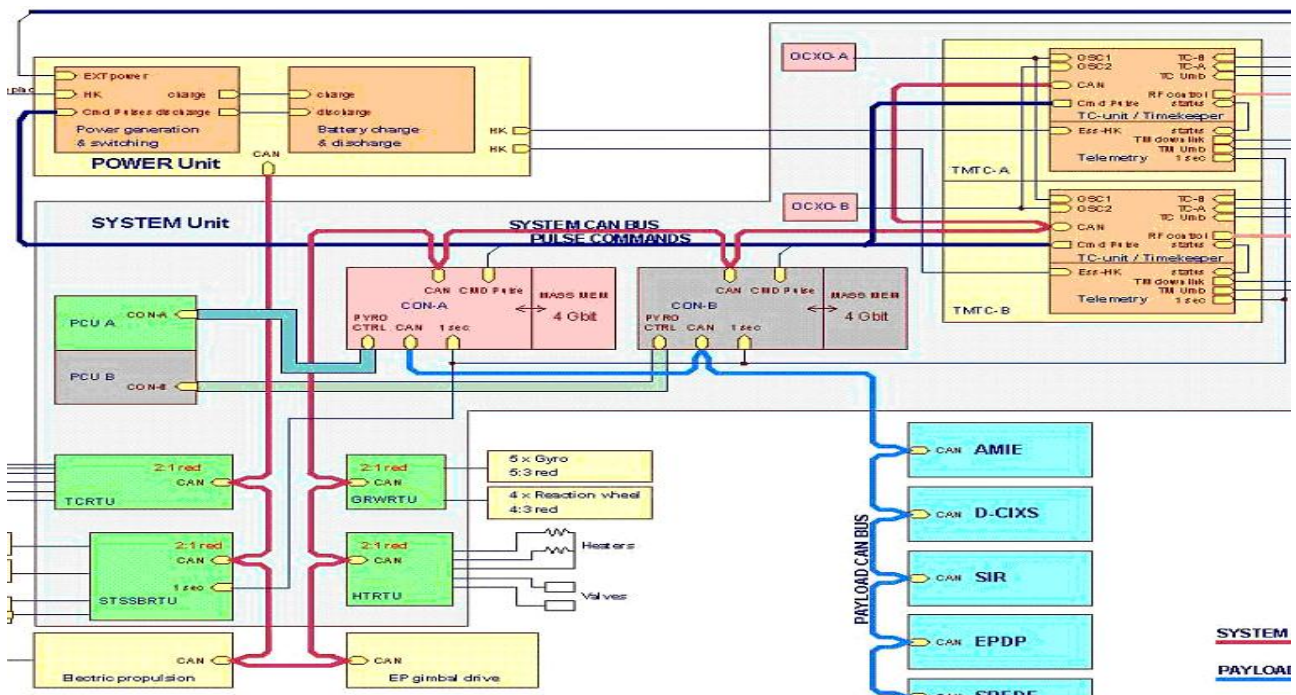


Εικόνα 11. Κατανεμημένη αρχιτεκτονική ελέγχου για ένα πλοιάριο.

Στα χαρακτηριστικά των SeaCAN περιλαμβάνονται η χαμηλή χρήση του εύρους ζώνης της τάξης του 5%, το παγκόσμια ρολόι και ειδικές διατάξεις όσον αφορά την ασφάλεια και την ασφαλή παύση της λειτουργίας. Ο προγραμματισμός δικτύου με βάση το παγκόσμιο ρολόι χρησιμοποιείται για να επιβάλλει ένα μίγμα επικοινωνίας που ενεργοποιείται με βάση το χρόνο και το συμβάν.

#### **5.4 Διαστημόπλοιο SMART-1**

Το πρωτόκολλο CAN χρησιμοποιείται ακόμη και σε διαστημόπλοια. Το SMART-1 είναι η πρώτη ευρωπαϊκή αποστολή στη σελήνη, όπου το ακρωνύμιο είναι Small Missions for Advanced Research in Technology. Το διαστημικό σκάφος εκτοξεύτηκε με επιτυχία στις 27 Σεπτεμβρίου του 2003 από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος με τον εκτοξευτή Ariane V στο Διαστημικό Κέντρο της Γκουιάν στη Γαλλία. Η Σουηδική Διαστημική Εταιρία, η οποία ήταν ο κύριος ανάδοχος για το SMART-1 και έχει αναπτύξει αρκετά από τα υποσυστήματα του σκάφους, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονικών υπολογιστών, των ηλεκτρονικών συστημάτων πτήσης, καθώς και των συστημάτων ελέγχου θέσης και τροχιάς του διαστημοπλοίου. Μέρος της κατανεμημένης αρχιτεκτονικής του SMART-1 παρουσιάζεται στην εικόνα 12. Το διάγραμμα απεικονίζει τον διαχωρισμό του συστήματος σε δύο υποσυστήματα: ένα υποσύστημα για το σύστημα ελέγχου του SMART-1 και άλλο ένα για επιστημονικά πειράματα. Κάθε ένα από αυτά χρησιμοποιεί ένα ξεχωριστό δίκτυο CANbus. Ο έλεγχος του διαστημόπλοιου εκτελείται από δύο ελεγκτές CON-A και CON-B οι οποίοι δουλεύουν ταυτόχρονα και χρησιμοποιούνται ο ένας ως εφεδρικός του άλλου. Οι περισσότεροι βρόχοι ελέγχου είναι κλειστοί πάνω στο δίκτυο CANbus, με κόμβους που παρέχουν λειτουργίες αισθητήρων και ελέγχου. Οι κόμβοι του CANbus δεν είναι υπεύθυνοι μόνο για τον έλεγχο του διαστημόπλοιου, αλλά και για την τηλεμετρία, τον τηλεχειρισμό, τον θερμικό έλεγχο, τους ανιχνευτές αστερών, τους αισθητήρες ήλιου, το γυροσκόπιο, το πηδάλιο υδραζίνης, τον έλεγχο ισχύος και διανομής, καθώς και τα ηλεκτρονικά πρόωσης και τον προσανατολισμό [7]. Στην εικόνα 12 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ελέγχου για ένα διαστημόπλοιο.



Εικόνα 12. Καταμεμημένη αρχιτεκτονική ελέγχου για ένα διαστημόπλοιο [7].

Έχουν σχεδιαστεί αρκετές διατάξεις για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία του συστήματος. Όλοι οι κόμβοι είναι διπλοί, μερικοί με ένα ενεργό και άλλοι με ένα παθητικό τρόπο. Κάθε κόμβος έχει ένα πρωτεύον και ένα δευτερεύον μονοπάτι επικοινωνίας. Μια στρατηγική και μια ιεραρχία έχουν οριστεί για την ανίχνευση σφαλμάτων και την ανάκτηση επικοινωνίας. Ο ελεγκτής δικτύου του διαστημόπλοιο μπορεί να πάρει την απόφαση να επικοινωνήσει από το πρωτεύον ή από το δευτερεύον μονοπάτι επικοινωνίας. Οι περισσότεροι άλλοι κόμβοι απλώς θα ελέγξουν για το μήνυμα καλής λειτουργίας του ελεγκτή δικτύου του διαστημόπλοιο. Εάν το μήνυμα καλής λειτουργίας δεν είναι διαθέσιμο, οι κόμβοι θα προσπαθήσουν να μεταβούν στο εναλλακτικό μονοπάτι επικοινωνίας. Η μονάδα ισχύος έχει ως στόχο την ιεραρχία της αυτονομίας και θα στραφεί στον εναλλακτικό ελεγκτή του διαστημικού σκάφους εάν θεωρήσει ότι ο πρωτεύων ελεγκτής δεν λειτουργεί κανονικά. Η μονάδα ισχύος μπορεί επίσης να ελέγχει την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση των άλλων κόμβων. Ως έσχατο μέσο για την ανάκτηση μπορούν να χρησιμοποιηθούν απομακρυσμένα συστήματα ελέγχου από τη γη.

Η ανοχή της ακτινοβολίας και η ανίχνευση της ακτινοβολίας που προκαλείται από τα σφάλματα είναι κρίσιμες μετρήσεις για το SMART-1. Δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν συνήθεις



ελεγκτές CAN, επειδή δεν είναι ανθεκτικοί στην ακτινοβολία. Αντί αυτού, η άδεια χρήσης του κώδικα VHDL για CAN αγοράστηκε από την Bosch και χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή ενός CAN ελεγκτή ανθεκτικού σε ακτινοβολία FPGA (Field Programmable Gate Array). Μερικά άλλα χαρακτηριστικά προστέθηκαν στο πρωτόκολλο CAN ταυτόχρονα, όπως η ειδική ανίχνευση σφάλματος και οι μηχανισμοί χειρισμού σφάλματος. Επιπλέον, προστέθηκε συγχρονισμός ρολογιού, έτσι ώστε η ανάλυση του ρολογιού έγινε καλύτερη από 1 msec. Επιδράσεις που οφείλονται στην ακτινοβολία μπορούν ακόμα να προκαλέσουν την καταστροφή πλαισίων. Συνεπώς, επιλέχθηκε ένα από τα ID bits για να χρησιμοποιηθεί ως ένα επιπλέον bit ισοτιμίας για το πεδίο ID [7], [10].

## 5.5 Αεροπλάνο τύπου Boeing

Όπως όλα τα μέσα μεταφοράς, έτσι και τα αεροσκάφη τείνουν να χρησιμοποιούν όλο και περισσότερα ηλεκτρονικά συστήματα (έλεγχος πτήσης, σύστημα αερισμού καμπίνας). Η όλο και μεγαλύτερη χρήση των μικροεπεξεργαστών στο αεροσκάφος οδηγεί σε μια αύξηση της ροής δεδομένων μεταξύ συστημάτων.

Παραδείγματα συστημάτων επικοινωνίας στην αεροπλοΐα είναι τα CAN, AFDX, TTP και FlexRay.

Τα πρώτα CANbus εισήχθησαν σε αεροσκάφη το 2001 για το A340-600 στα συστήματα καμπίνας (ανιχνευτής καπνού, σύστημα αερισμού κλπ.) με ένα μικρό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 100 Kbit/s και κάτω. Η ευελιξία και η απόδοση του CANbus οδήγησε στην εκτεταμένη χρήση του στο αεροσκάφος A380 και σε πιο κρίσιμες εφαρμογές (διανομής ηλεκτρικού ρεύματος, πίνακες πιλοτηρίου κλπ.) με ένα μεγαλύτερο αριθμό κόμβων (πάνω από 500) και μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων που φτάνουν το 1Mbit/s. Ακόμα και τα πιο καινούρια μοντέλα αεροσκαφών τύπου Boeing 787, A400M, A350 χρησιμοποιούν επίσης σε μεγάλο βαθμό το CANbus. Το CANbus φαίνεται πλέον να έχει εξελιχθεί σαν ένα από τα πιο σημαντικά δίκτυα επικοινωνίας του αεροσκάφους.

Ωστόσο το 1 Mbit/s εύρος ζώνης δεν ταιριάζει με τις ανάγκες του αεροσκάφους που θέλει να συνδέσει τα διάφορα συστήματα. Για το λόγο αυτό, ένας ρυθμός μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 100 Mbit/s θεωρήθηκε απαραίτητος και μπορεί να τον προσφέρει το δίκτυο AFDX (Avionics Full Duplex), το οποίο περιλαμβάνει προηγμένους μηχανισμούς ελέγχου για την δρομολόγηση των δεδομένων. Δημιουργήθηκε λοιπόν η ανάγκη για μια αξιόπιστη, οικονομική και αποδοτική ενδιάμεση λύση με ένα ρυθμό μετάδοσης δεδομένων περίπου στα 10 Mbit/s.

Δύο τύποι δικτύων μπορούσαν να καλύψουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά:

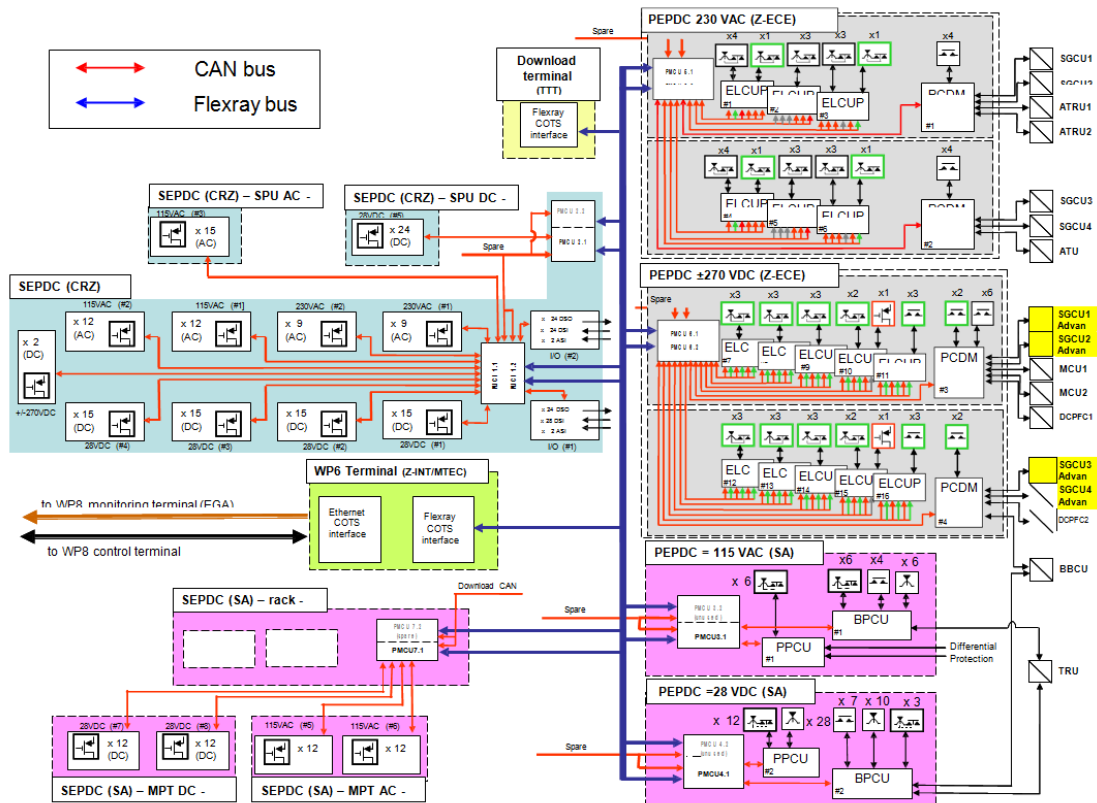
- Το δίκτυο TTP που υπάρχει στο A380 (σύστημα αερισμού καμπίνας) και στο 787 (ηλεκτρικό σύστημα).
- Το δίκτυο FlexRay που ήδη είχε ενσωματωθεί σε αρκετούς μικροεπεξεργαστές, αλλά χρησιμοποιούνταν μόνο στον τομέα του αυτοκινήτου.

Ήταν τότε μια ευκαιρία να μελετηθεί το δίκτυο FlexRay και να αξιολογηθούν οι δυνατότητες χρησιμοποίησής του για ένα πλήρες ηλεκτρικό σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα αεροσκάφος.

Επιπλέον, η επιλεγμένη αρχιτεκτονική θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί σε συνεργασία με μια

αρχιτεκτονική δικτύου CAN, σαν αποτέλεσμα μιας μικτής υβριδικής αρχιτεκτονικής.

Το CANbus στην αεροπλοία καθορίζεται από δύο βασικά πρότυπα το ISO 11898 και το ARINC825 [30], [31], [32], [33], [34], [35], [45], [46].



Εικόνα 13. Αρχιτεκτονική κατακεντρωμένου ελέγχου αεροσκάφους τύπου Boeing.

Η προδιαγραφή FlexRay συντηρείται από την κοινοπραξία FlexRay που ιδρύθηκε το 2000. Οι αυξανόμενες απαιτήσεις για μεγαλύτερο εύρος ζώνης καθώς και η ικανότητα και η αξιοπιστία ενός δικτύου σε πραγματικό χρόνο ήταν οι κινητήριες δυνάμεις πίσω από το σχεδιασμό του FlexRay. Το FlexRay χρησιμοποιείται για την ενοποίηση των πολλαπλών δικτύων CAN [22],[23],[24].

### 5.5.1 Πλεονεκτήματα FlexRay

- Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στα 10 Mbit/s δέκα φορές μεγαλύτερος από εκείνον του διαύλου CAN.
- Ντετερμινισμός στο στατικό τμήμα του κύκλου επικοινωνίας.
- Ο προσχεδιασμένος προγραμματισμός δημιουργεί έναν υψηλό βαθμό συνθετικότητας των στοιχείων του συστήματος.
- Ο εξωτερικός ενιαίος χρονισμός (global clock) κάνει το βασισμένο στο χρόνο δίκτυο πιο ισχυρό στην αποτυχία επικοινωνίας των κόμβων του.
- Δυνατότητα να βελτιστοποιηθεί η χρήση του εύρους ζώνης στο στατικό τμήμα με ένα φορτίο διαύλου περίπου στο 70%.
- Η δυναμική τμηματοποίηση προσφέρει ευελιξία στους κόμβους που δεν υποχρεούνται να διαβιβάζουν τα δεδομένα συχνά ή για σποραδικά και μη-κρίσιμα δεδομένα (π.χ. διάγνωση).
- Η εφαρμογή μιας αρχιτεκτονικής η οποία είναι βασισμένη στο χρόνο επιτρέπει τη δημιουργία ενός εξαιρετικά προβλέψιμου ντετερμινιστικού συστήματος. Η καθυστέρηση μπορεί αξιόπιστα να μειώνεται στο ελάχιστο.
- Σε ένα δίκτυο διπλού καναλιού FlexRay, οι δύο δίαυλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεξάρτητα ή σε πλεονασμό (πρωτεύων - δευτερεύων) ή με ένα μικτό τρόπο [22].

### 5.5.2 Μειονεκτήματα FlexRay

- Το μέγιστο μήκος καλωδίου μεταξύ δύο κόμβων είναι 24 μέτρα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι και 22 κόμβοι σε ένα δίκτυο, σύμφωνα με το πρότυπο προδιαγραφών EPL. Η μείωση του ρυθμού δεδομένων από 5 Mbit/s και κάτω μπορεί να επιτρέψει μεγαλύτερο μήκος καλωδίου.
- Δεν υπάρχει ενσωματωμένος μηχανισμός αναγνώρισης στο πρωτόκολλο. Οι κόμβοι που μεταδίδουν δεν έχουν πληροφορίες σχετικά με την επιτυχία ή την αποτυχία της μετάδοσης. Εάν χρειαστεί αναγνώριση θα πρέπει να υλοποιηθεί σε υψηλότερο στρώμα. Σε σύγκριση με ένα πρωτόκολλο επιπέδου εφαρμογής (π.χ. CANbus), η πολυπλοκότητα του συστήματος αυξάνεται, καταναλώνεται πρόσθετο εύρος ζώνης και μειώνεται η συνολική αποτελεσματικότητα του δικτύου.
- Αναποτελεσματική κατανομή εύρους ζώνης. Όλες οι μεταδόσεις στο στατικό τμήμα έχουν

το ίδιο μέγεθος, το οποίο έχει σοβαρές επιπτώσεις στην αποδοτικότητα των δεδομένων, όταν στο δίκτυο δεν ανταλλάσσονται ίδιες ποσότητες δεδομένων. Επιλέγοντας ένα μεγάλο μέγεθος πλαισίου δημιουργεί απώλεια εύρους ζώνης για τους κόμβους που πρέπει να στείλουν μόνο ένα μικρό ποσό δεδομένων.

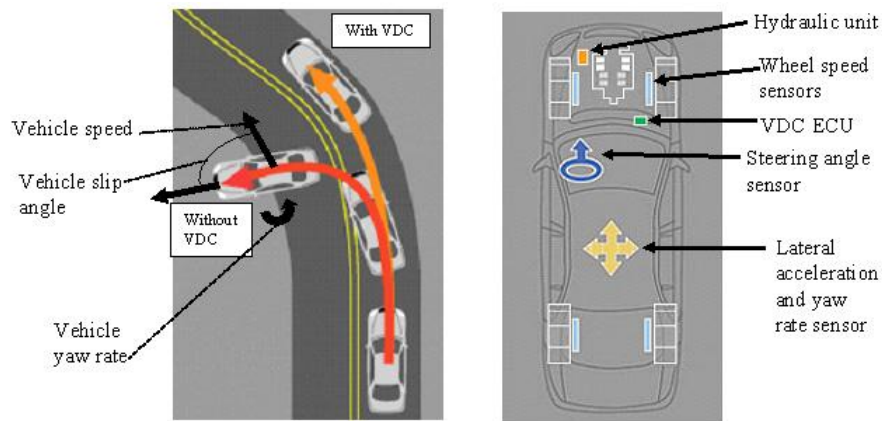
- Χρησιμοποιώντας ένα μικρό μέγεθος πλαισίου δημιουργούνται επίσης προβλήματα [22].

## 6 Εφαρμογές Ελέγχου

Σε αυτή την ενότητα θα μελετηθούν τέσσερα συστήματα ελέγχου οχημάτων κλειστού βρόχου. Το πρώτο παράδειγμα είναι ένα σύστημα δυναμικού ελέγχου οχήματος για τα επιβατικά αυτοκίνητα που κατασκευάζεται από την Bosch. Το δεύτερο παράδειγμα είναι η πλεύση και η τροχιά του συστήματος ελέγχου για το διαστημόπλοιο SMART-1 το οποίο μελετήθηκε και στην προηγούμενη ενότητα. Το τρίτο παράδειγμα είναι το σύστημα ελέγχου ειδοποίησης και παρακολούθησης πλοίου (Alarm and Monitoring System) και το τέταρτο το σύστημα ελέγχου κίνησης πλοίου (Propulsion Control).

### 6.1 Σύστημα δυναμικού ελέγχου οχήματος

Τα δυναμικά συστήματα ελέγχου οχήματος έχουν σχεδιαστεί για να βοηθούν τον οδηγό σε καταστάσεις υπερστροφής, υποστροφής και άλλων επικίνδυνων καταστάσεων ολίσθησης. Η αρχή του συστήματος Vehicle Dynamic Control (VDC) απεικονίζεται στην εικόνα 14. Το αριστερό σχήμα δείχνει μια κατάσταση υπερστροφής του οχήματος. Αναλυτικότερα ξεπερνιούνται τα όρια τριβής για τους πίσω τροχούς που προκαλούν οι δυνάμεις των ελαστικών προκαλώντας τον κορεσμό (αντίθετα κορεσμός στους εμπρός τροχούς θα προκαλέσει μία κατάσταση υποστροφής). Σε αυτή την περίπτωση το αυτοκίνητο θα αρχίσει να ολισθαίνει, πράγμα που σημαίνει ότι το ποσοστό εκτροπής και η πλευρική γωνία ολίσθησης του οχήματος θα αποκλίνει από αυτό που ορίζει ο οδηγός. Για το όχημα στα δεξιά σχήμα, το ενσωματωμένο VDC θα ανιχνεύσει την κατάσταση ολίσθησης πριν δημιουργηθεί και θα υπολογίσει μια ροπή αντιστάθμισης, η οποία για την κατάσταση που απεικονίζεται μεταφράζεται σε εφαρμογή μιας δύναμης πέδησης στον εξωτερικό εμπρός τροχό. Αυτή η δύναμη πέδησης θα παρέχει μια ροπή αντιστάθμισης και η πέδηση θα μειώσει επίσης την πλευρική δύναμη για αυτό τον τροχό [14].



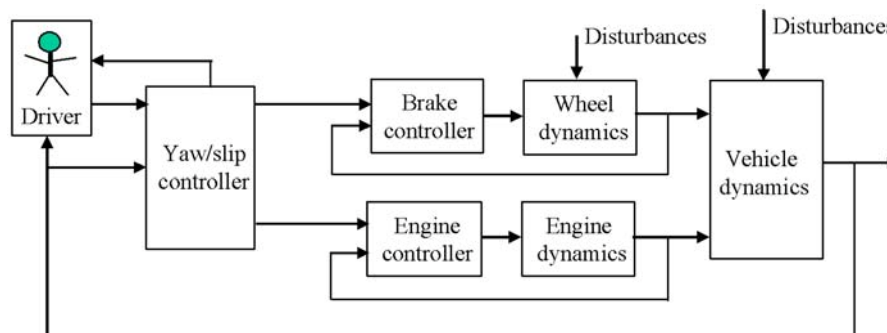
Εικόνα 14. Συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της υπερστροφίας για οχήματα με και χωρίς σύστημα VDC (αριστερό σχήμα). Συστήματα που δρουν κατά τη λειτουργία του VDC (δεξιά εικόνα) [20].

Το σύστημα VDC συγκρίνει την εκτιμώμενη πορεία που ορίζει ο οδηγός, μετρώντας τη γωνία του τιμονιού και δεδομένα άλλων σχετικών αισθητήρων, με την πραγματική κίνηση του οχήματος. Όταν αυτά αποκλίνουν πάρα πολύ, το VDC θα παρέμβει εφαρμόζοντας αυτόματα τα μεμονωμένα φρένα των τροχών και ελέγχοντας τη ροπή του κινητήρα, προκειμένου το όχημα να ακολουθήσει το μονοπάτι που ορίζεται από τον οδηγό με τις λιγότερες δυνατές αποκλίσεις. Οι κεντρικές συνιστώσες του VDC απεικονίζονται στο δεξιό μέρος του παραπάνω σχήματος [14].

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα εννοιολογικό διάγραμμα του VDC. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται από τρεις ελεγκτές:

- Τον ελεγκτή ολίσθησης, ο οποίος ελέγχει τη συνολική δυναμική του οχήματος με βάση το συντελεστή περιστροφής του οχήματος και την πλευρική γωνία ολίσθησης του οχήματος
- Τον ελεγκτή πέδησης, ο οποίος ελέγχει τις δυνάμεις πέδησης σε κάθε τροχό ξεχωριστά.
- Τον ελεγκτή κινητήρα, ο οποίος ελέγχει τη ροπή του κινητήρα.

Οι είσοδοι στον ελεγκτή ολίσθησης περιλαμβάνουν όλες τις εντολές του οδηγού όπως: το πεντάλ γκαζιού, τη γωνία του τιμονιού και το πεντάλ πέδησης. Με βάση αυτά τα δεδομένα και τα δεδομένα άλλων αισθητήρων, υπολογίζονται οι ονομαστικές τιμές για το ρυθμό περιστροφής και πλευρικής ολίσθησης του οχήματος. Έπειτα, συγκρίνονται με τη μετρούμενη ταχύτητα περιστροφής και την εκτιμώμενη πλευρική ολίσθηση. Το φρένο και οι ελεγκτές του κινητήρα είναι συνήθως Proportional Integral Derivative (PID) ελεγκτές και επίσης χρησιμοποιούν τις τοπικές πληροφορίες αισθητήρων όπως την ταχύτητα των τροχών.



Εικόνα 15. Δομή ελέγχου του συστήματος VDC

Το σύστημα VDC πρέπει να λάβει υπόψη τη συμπεριφορά του οδηγού, καθώς και τις διαταραχές που επενεργούν πάνω στο όχημα, συμπεριλαμβανομένων των πλευρικών ανέμων, των ασύμμετρων συντελεστών τριβής, και την ακραία περίπτωση ενός κατεστραμμένου ελαστικού.

Το σύστημα VDC χρησιμοποιεί το CANbus, καθώς εξαρτάται από διάφορες ECU, αν και η κύρια λειτουργία ανήκει σε μια συγκεκριμένη ECU. Η εφαρμογή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή του μηχανισμού πέδησης (π.χ. υδραυλικός, πνευματικός, ηλεκτρουδραυλικός, ηλεκτρομηχανικός), τη διαθεσιμότητα μιας ECU μετάδοσης και τη διασύνδεση με την ECU του κινητήρα. Ένα ξεχωριστό σύστημα καταναμημένου ελέγχου χρησιμοποιείται συχνά για τα φρένα. Για παράδειγμα, τα φορτηγά έχουν συχνά ένα ECU ανά ζεύγος τροχών και ένα επιπλέον ελεγκτή για το ρυμουλκούμενο. Δεδομένου ότι ορισμένοι από τους βρόχους ελέγχου ενός συστήματος VDC είναι κλειστοί, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι καθυστερήσεις και τα σφάλματα στο καταναμημένο σύστημα [14], [20].



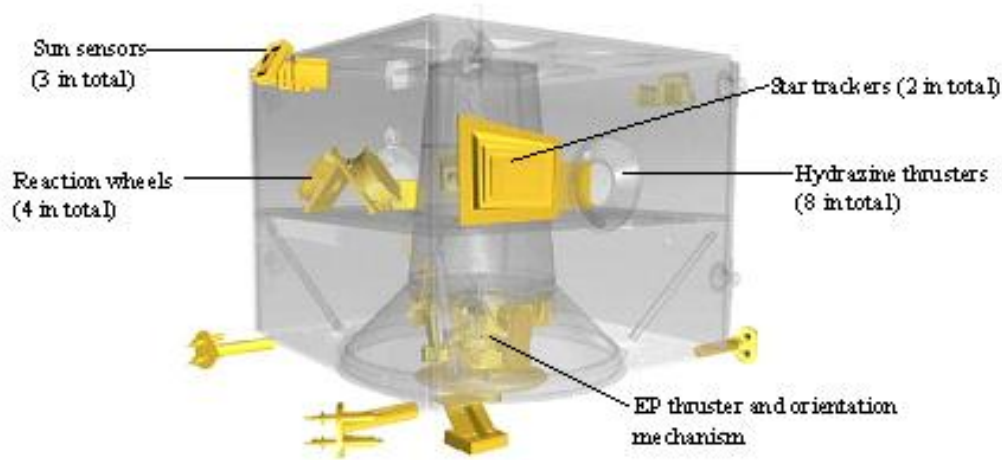
## 6.2 Σύστημα ελέγχου πλεύσης και τροχιάς

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται τα μέρη του SMART-1 που αφορούν τα συστήματα ελέγχου της πλεύσης και της τροχιάς του. Γίνεται και αναφορά στο πώς έχει εφαρμοστεί στο εσωτερικό του σκάφους το καταναμημένο σύστημα του υπολογιστή. Επίσης περιγράφεται η αρχιτεκτονική ελέγχου και το CANbus του SMART-1.

Οι στόχοι του συστήματος ελέγχου της πλεύσης και της τροχιάς είναι:

- Να ακολουθείται η επιθυμητή πορεία, σύμφωνα με τους στόχους της αποστολής,
- Οι ηλιακοί συλλέκτες να στοχεύουν προς τον ήλιο.
- Η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.

Οι στόχοι του ελέγχου θα πρέπει να πληρούνται, παρά το σκληρό περιβάλλον και τις διαταραχές της ροπής που δρουν στο διαστημικό σκάφος. Υπάρχουν διάφορες φάσεις τις οποίες το σύστημα ελέγχου θα πρέπει να είναι σε θέση να χειριστεί, όπως η φάση αμέσως μετά το διαχωρισμό από τον εκτοξευτή, οι φάσεις πρόωσης για να μπει σε τροχιά γύρω από τη σελήνη και, τέλος, η φάση παρατήρησης της σελήνης.



Εικόνα 16. Η δομή του διαστημόπλοιου SMART-1 με αισθητήρες και ενεργοποιητές για το σύστημα ελέγχου πλεύσης και τροχιάς.

Στην εικόνα 16 απεικονίζονται οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της πλεύσης του διαστημικού σκάφους. Συγκεκριμένα ως αισθητήρες περιγράφονται ένας ανιχνευτής αστερών και οι αισθητήρες γωνιακής ταχύτητας του σκάφους. Ως ενεργοποιητές περιγράφονται οι τροχοί αντίδρασης και οι προωθητήρες του σκάφους. Υπάρχουν τέσσερις τροχοί

αντίδρασης ευθυγραμμισμένοι σε μια διαμόρφωση πυραμίδας. Το σύστημα προώθησης αποτελείται από τέσσερις πρωτεύοντες και τέσσερις δευτερεύοντες προωθητήρες .

Το σύστημα ελέγχου πλεύσης και τροχιάς αποτελείται από ένα σύνολο λειτουργιών ελέγχου που αφορούν την απόσβεση ρυθμού, τη στόχευση του ήλιου, τη μείωση της ορμής, τον έλεγχο της πλεύσης σε τρεις άξονες και τα πηδάλια προσανατολισμού. Το σύστημα έχει μια σειρά από τρόπους λειτουργίας, οι οποίοι αποτελούνται από ένα υποσύνολο των εν λόγω λειτουργιών ελέγχου [7], [10].

### **6.3 Σύστημα ελέγχου ειδοποίησης και παρακολούθησης πλοίου (Alarm and Monitoring System)**

Όπως σε όλα τα μέσα μεταφοράς έτσι και στα πλοία το CANbus αποτελεί τη ραχοκοκκαλιά της επικοινωνίας των επί μέρους συστημάτων. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθεί η χρησιμότητα του CANbus σε ένα τυπικό σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης ενός πλοίου.

Ο αριθμός των ηλεκτρονικών υπολογιστών που χρειάζεται ένα πλοίο για το συγκεκριμένο σύστημα ξεκινάει από δύο και φτάνει μέχρι επτά, όπως φαίνεται και στην εικόνα 17.

Αρχικά οι πρώτοι δύο υπολογιστές (που ανάλογα με την αρχιτεκτονική του συστήματος μπορεί να είναι και οι μόνοι), βρίσκονται στο Engine Control Room (ECR) του πλοίου. Όπως και σε άλλα συστήματα έτσι και στο συγκεκριμένο οι σταθμοί υπάρχουν διπλοί για την ακραία περίπτωση της δυσλειτουργίας ή της κατάρρευσης ενός από τους δύο. Στη συνέχεια βρίσκουμε άλλους δύο ή τρεις ηλεκτρονικούς υπολογιστές στο Cargo Control Room (CCR) του πλοίου για τον ίδιο λόγο ανάλογα με την αρχιτεκτονική του συστήματος. Ακόμα ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής εγκαθίσταται στη γέφυρα του πλοίου και, τέλος, άλλος ένας στο Ship's Office.

Στον κάθε υπολογιστή εγκαθίσταται το κατάλληλο λογισμικό ανάλογα με το μέρος που βρίσκεται και τη δουλειά την οποία εκτελεί. Όλοι οι υπολογιστές επικοινωνούν μεταξύ τους με διπλό δίκτυο Ethernet. Οι δύο μεταγωγείς που είναι υπεύθυνοι για το κάθε δίκτυο βρίσκονται εγκατεστημένοι στο ECR του πλοίου. Κάθε υπολογιστής διαθέτει και έναν εκτυπωτή για να μπορεί να τυπώνει τις κρίσιμες λειτουργίες του, καθώς και ένα UPS για να μπορεί να συνδεθεί η τάση του ίδιου του ηλεκτρονικού υπολογιστή, της οθόνης του καθώς και του εκτυπωτή του.

Το δεύτερο πιο μεγάλο και πιο σημαντικό δίκτυο μέσα στο πλοίο είναι το CANbus. Σε αυτό το δίκτυο συνδέονται σε διπλό δίκτυο όλες οι μονάδες κατανεμημένου ελέγχου καθώς και σε μονό δίκτυο οι μονάδες ειδοποίησης.

Οι μονάδες κατανεμημένου ελέγχου είναι αυτόνομοι ελεγκτές με επεξεργαστή και ελεγκτή δικτύου οι οποίες δεχόμενες το κατάλληλο λογισμικό μπορούν να δεχτούν ψηφιακές και αναλογικές εισόδους και εξόδους.

Με τις ψηφιακές εισόδους μπορεί το σύστημα να επιτηρεί την κατάσταση (ανοιχτή ή κλειστή) από συστήματα όπως βαλβίδες, αντλίες, σειρήνες, γεννήτριες κλπ. Με τις αναλογικές εισόδους μπορεί το σύστημα να επιτηρεί την κατάσταση αναλογικών μεγεθών όπως στάθμες, θερμοκρασίες, πιέσεις κλπ.

Με τις ψηφιακές εξόδους μπορεί το σύστημα να ελέγχει την κατάσταση (ανοιχτή ή κλειστή) από

διάφορα συστήματα, όπως βαλβίδες, αντλίες, σειρήνες, γεννήτριες κλπ. Με τις αναλογικές εξόδους μπορεί το σύστημα να ελέγχει την κατάσταση αναλογικών οργάνων.

Οι συγκεκριμένες μονάδες κατανεμημένου ελέγχου διαθέτουν διπλό CANbus και έχουν τη δυνατότητα να μπορούν να λειτουργούν ακόμα και όταν όλο το σύστημα έχει καταρρεύσει.

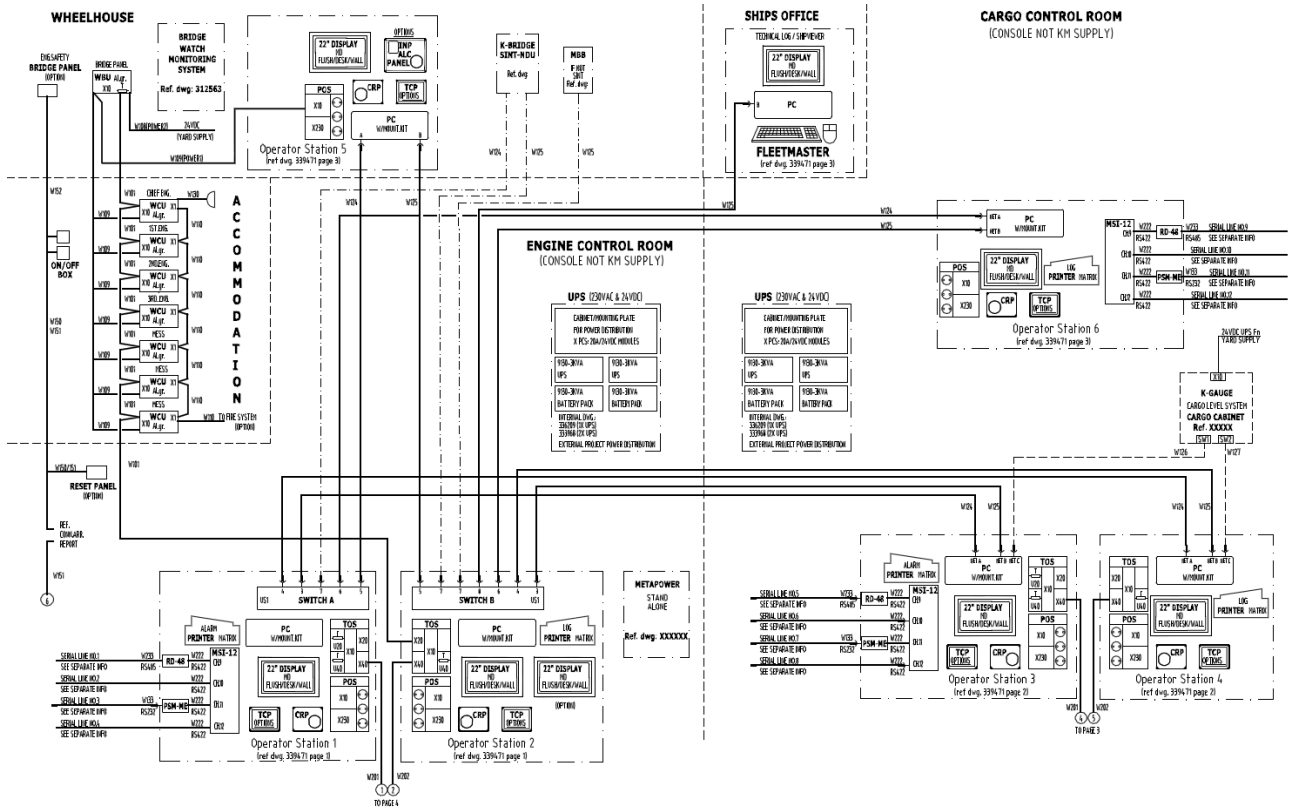
Ανάλογα με την αρχιτεκτονική του πλοίου μπορούμε να συναντήσουμε παγκόσμια και τοπικά CANbus δίκτυα όπου συγκεκριμένες μονάδες αναλαμβάνουν αυτό το ρόλο. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνεται μεγαλύτερος διαχωρισμός στα επί μέρους συστήματα.

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται οι μονάδες κατανεμημένου ελέγχου καθώς και ο διαχωρισμός σε παγκόσμια και τοπικά CANbus δίκτυα.

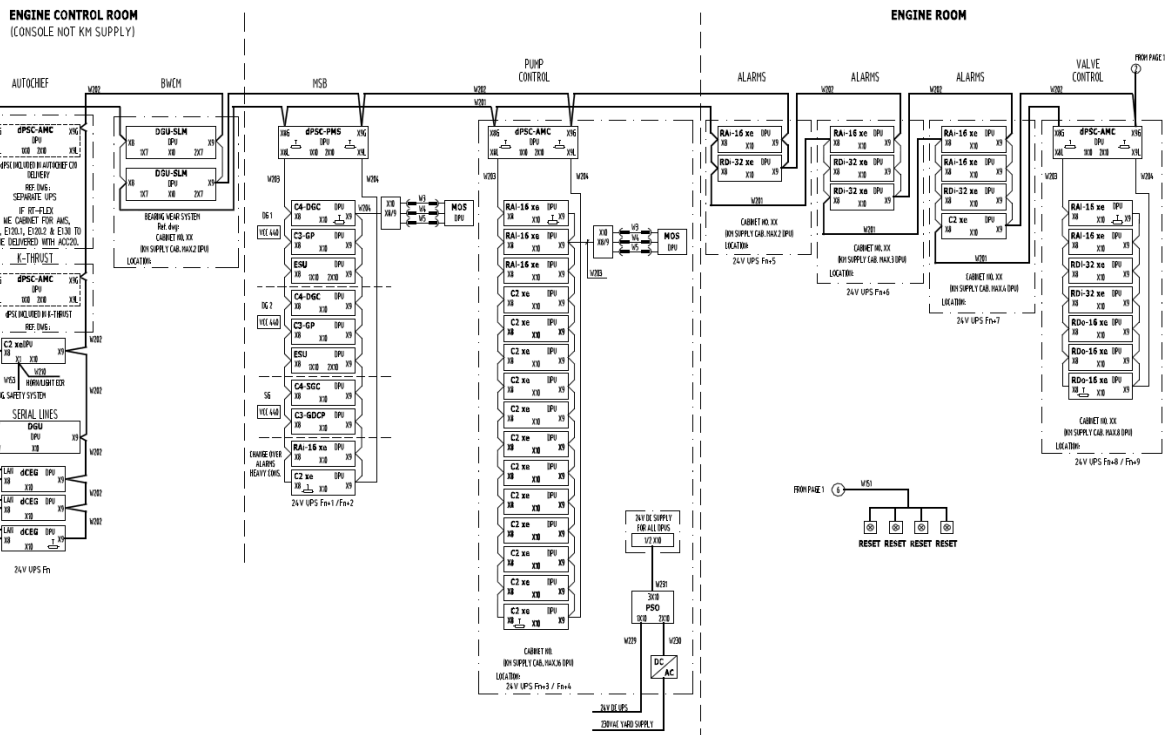
Επίσης σε απλό δίκτυο CANbus συνδέονται οι μονάδες ειδοποίησης. Οι μονάδες ειδοποίησης είναι συσκευές που βρίσκονται σε κύρια μέρη όπως στη γέφυρα του πλοίου, στις καμπίνες των μηχανικών καθώς και σε όλους τους κοινόχρηστους χώρους του πλοίου. Έχουν σαν σκοπό σε οποιαδήποτε κατάσταση συναγερμού να ειδοποιούν τους κατάλληλους ανθρώπους όπου μπορούν να επιληφθούν του συγκεκριμένου προβλήματος.

Στην εικόνα 17 απεικονίζονται οι συγκεκριμένες μονάδες ειδοποίησης.

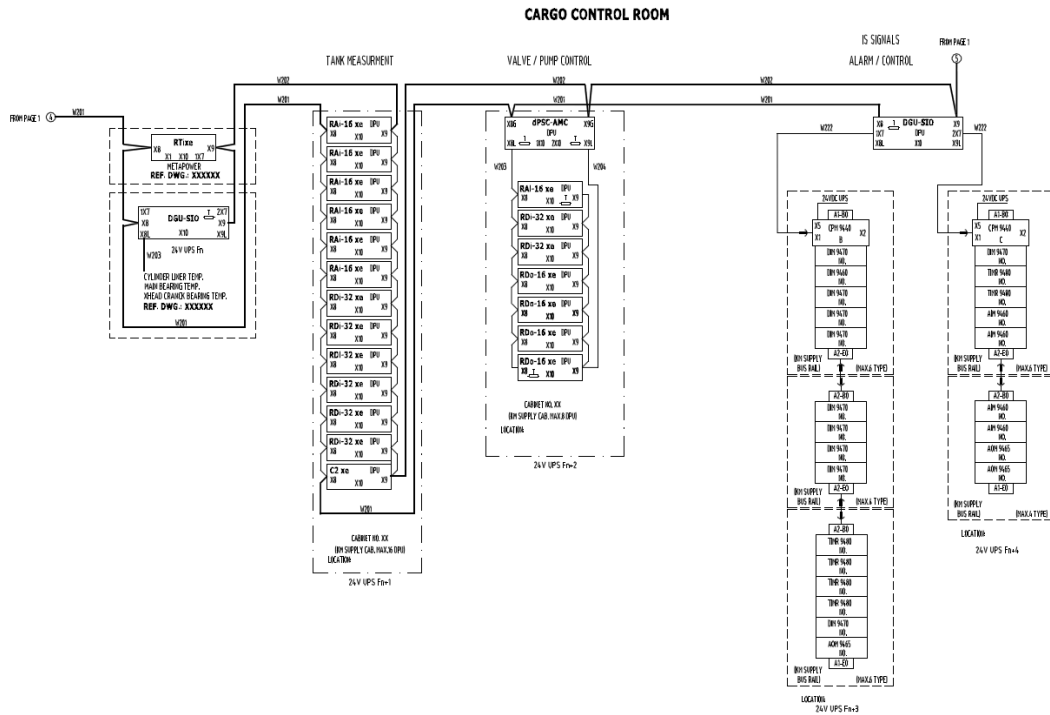
Όλα τα δίκτυα CANbus καταλήγουν στους δύο πιο σημαντικούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές του πλοίου, σε αυτούς που βρίσκονται στο ECR και από εκεί μέσω του δικτύου Ethernet του πλοίου έχουν τη δυνατότητα και οι υπόλοιποι ηλεκτρονικοί υπολογιστές να παραλάβουν τα σήματα τα οποία χρειάζονται.



Εικόνα 17. Αρχιτεκτονική για το σύστημα ελέγχου ειδοποίησης και παρακολούθησης σε ένα πλοίο (Παραχώρηση της ΚΜ).



Εικόνα 18. Καταμεμημένη αρχιτεκτονική ελέγχου στο ECR και στο ER σε ένα πλοίο (Παραχώρηση της ΚΜ).



Εικόνα 19. Καταμεμημένη αρχιτεκτονική ελέγχου για έλεγχο στάθμης, έλεγχο βαλβίδων και αντλιών σε ένα πλοίο (Παραχώρηση της ΚΜ).

#### **6.4 Σύστημα ελέγχου κίνησης πλοίου (Propulsion Control)**

Ένα ακόμα δίκτυο CANbus διαφορετικό από αυτό που αναλύθηκε παραπάνω είναι το σύστημα ελέγχου κίνησης του πλοίου. Πρόκειται για ένα τελείως διαφορετικό σύστημα το οποίο μπορεί να λειτουργήσει και αυτόνομα αλλά και σε συνεργασία με το σύστημα ελέγχου ειδοποίησης και παρακολούθησης πλοίου.

Το σύστημα ελέγχου κίνησης πλοίου είναι υπεύθυνο για την κίνηση της προπέλας του πλοίου και κατ' επέκταση για την συνολική κίνηση του πλοίου. Το σύστημα ελέγχου κίνησης πλοίου είναι διαφορετικό από το σύστημα κατεύθυνσης του πλοίου και δεν αναλύεται στη συγκεκριμένη εργασία.

Η επικοινωνία στο σύστημα αποτελείται από διπλό δίκτυο CANbus.

Το σύστημα αποτελείται από δύο Panel PC σε συνδυασμό με τους αντίστοιχους τηλεγράφους. Το ένα ζευγάρι βρίσκεται στη γέφυρα του πλοίου και το άλλο στο Engine Control Room (ECR). Στα Panel PC είναι εγκατεστημένο το κατάλληλο λογισμικό για την επικοινωνία και τη διαχείριση ψηφιακών και αναλογικών εισόδων – εξόδων. Οι αντίστοιχες μονάδες τηλεγράφου είναι αυτές που δίνουν τις βασικές εντολές (πρόσω, πίσω κλπ.) στο σύστημα. Υπάρχει και τρίτη τοπική μονάδα τηλεγράφου στο χώρο του Engine Room (ER) η οποία ελέγχει τις κινήσεις της μηχανής με μπουτόν.

Το σύστημα ελέγχου κίνησης του πλοίου διαθέτει μονάδες καταναμημένου ελέγχου με διπλό δίκτυο CANbus που έχουν τη δυνατότητα να μπορούν να λειτουργούν ακόμα και όταν όλο το σύστημα έχει καταρρεύσει.

Ανάλογα με την αρχιτεκτονική του πλοίου μπορούμε να συναντήσουμε το δίκτυο CANbus χωρισμένο σε υποδίκτυα, όπου συγκεκριμένες μονάδες αναλαμβάνουν να εκτελέσουν συγκεκριμένες λειτουργίες. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερος διαχωρισμός στα επί μέρους συστήματα.

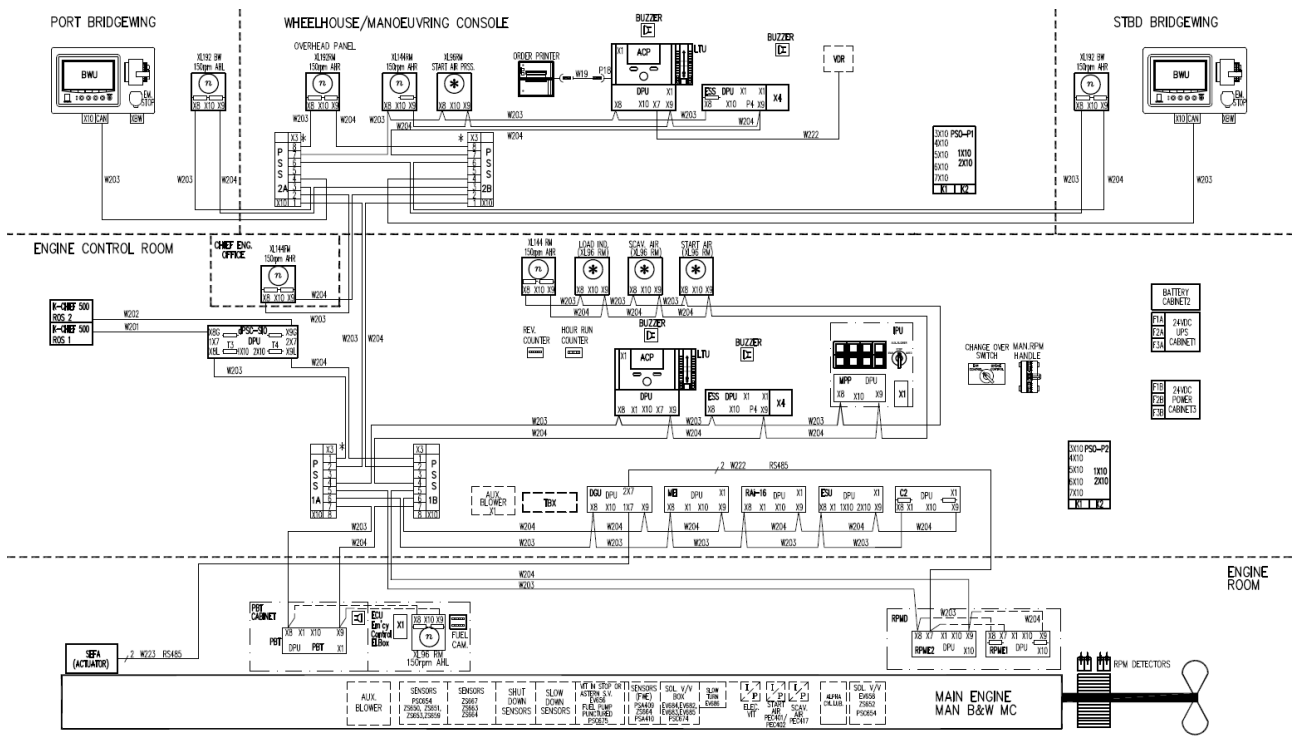
Στην εικόνα 20 απεικονίζονται οι μονάδες καταναμημένου ελέγχου καθώς και ο διαχωρισμός σε επί μέρους CANbus δίκτυα.

Επίσης, στο σύστημα ελέγχου κίνησης πλοίου υπάρχει μονάδα που ελέγχει τις στροφές της μηχανής, τη μονάδα προστασίας της μηχανής και τη μονάδα επιτήρησης αναλογικών (θερμοκρασίες, πιέσεις) και ψηφιακών τιμών (βαλβίδες, αντλίες, σειρήνες) της μηχανής.

Υπάρχουν, επίσης, μονάδες ελέγχου της μηχανής στις δύο πλευρές της γέφυρας οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία προσέγγισης - πρόσδεσης και αποχώρησης του πλοίου στο

λιμάνι. Επίσης, ανάλογα με την αρχιτεκτονική του πλοίου μπορεί να υπάρχουν και μοχλοί ελέγχου των εμπρόσθιων προπελών του πλοίου οι οποίες ελέγχουν την κατεύθυνσή του.

Με δίκτυο CANbus επίσης συνδέεται και η μονάδα ελέγχου καυσίμων και οξυγόνου που είναι υπεύθυνη για την ποσότητα πετρελαίου και αέρα που θα εισέλθουν στο θάλαμο καύσης. Επίσης, στο ίδιο δίκτυο συνδέεται και η μονάδα που ανιχνεύει τις στροφές της μηχανής καθώς και τη φορά με την οποία στρέφεται.



Εικόνα 20. Αρχιτεκτονική για το σύστημα ελέγχου κίνησης σε ένα πλοίο (Παραχώρηση της ΚΜ).





## 7 Αξιολόγηση Απόδοσης Δικτύων Ελέγχου

Η παραδοσιακή αρχιτεκτονική της επικοινωνίας για τα συστήματα ελέγχου είναι από σημείο σε σημείο, το οποίο έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στη βιομηχανία εδώ και δεκαετίες. Ωστόσο, η επέκταση των φυσικών εγκαταστάσεων και η ανάγκη για αυξημένη λειτουργικότητα ωθεί στα όρια την συγκεκριμένη αρχιτεκτονική. Ως εκ τούτου, ένα παραδοσιακό σύστημα ελέγχου σημείο προς σημείο δεν είναι πλέον κατάλληλο για να ανταποκριθεί στις νέες απαιτήσεις, όπως η σπονδυλωτή κατασκευή, η αποκέντρωση του ελέγχου, τα ολοκληρωμένα διαγνωστικά, η γρήγορη και εύκολη συντήρηση και το χαμηλό κόστος. Συστήματα δικτύου με κοινές αρχιτεκτονικές δικτύου, που ονομάζονται Network Control Systems (NCS), παρέχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως μικρό όγκο καλωδίωσης και κατανεμημένο έλεγχο. Ειδικά όσον αφορά την κατασκευή των συστημάτων, οι αρχιτεκτονικές NCS χρησιμοποιούν την επεξεργαστική ισχύ σε κάθε κόμβο για να επιτρέψουν τη λειτουργία ανά κόμβο (σπονδυλωτά) και τυποποιημένες διεπαφές επιτρέπουν την εναλλαξιμότητα και τη διαλειτουργικότητα. Μοντέλα συσκευών βασισμένα πάνω σε ένα αντικείμενο διαχωρίζουν τη γενική χρήση με στόχο κάθε συσκευή να είναι ειδικά σχεδιασμένη για ειδικές λειτουργίες. Πολλοί διαφορετικοί τύποι δικτύου έχουν προταθεί για χρήση σε συστήματα ελέγχου. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αξιολογήσουμε τρία από αυτά: το δίκτυο Ethernet (CSMA / CD), το δίκτυο βασισμένο στο Token (ControlNet) και το δίκτυο βασισμένο στο Can (DeviceNet).

Τα κατανεμημένα συστήματα περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό συσκευών διασυνδεδεμένων για να εκτελέσουν τις επιθυμητές λειτουργίες σε μια μεγάλη περιοχή κάλυψης. Μερικά παραδείγματα αφορούν το βιομηχανικό αυτοματισμό, τους αυτοματισμούς κτιρίων, τους αυτοματισμούς σε γραφεία και σπίτια, τα ευφυή συστήματα οχημάτων, καθώς και τα προηγμένα συστήματα αεροσκαφών και διαστημοπλοίων. Τα δίκτυα δεδομένων ή τα δίκτυα ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ανάλογα με τις πληροφορίες που ανταλλάσσονται. Τα δίκτυα δεδομένων χαρακτηρίζονται από μεγάλα πακέτα δεδομένων με συνήθως σπάνιους υψηλούς φόρτους δικτύου και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Γενικά δεν εμφανίζουν σκληρούς χρονικούς περιορισμούς. Τα δίκτυα ελέγχου αντιθέτως, πρέπει να μεταφέρουν πολλά μικρά πακέτα αλλά με αρκετά μεγάλη συχνότητα, ανάμεσα σε ένα σχετικά μεγάλο σύνολο κόμβων για την κάλυψη των χρονικά κρίσιμων απαιτήσεων του δικτύου. Το στοιχείο κλειδί που διακρίνει τα δίκτυα ελέγχου από τα δίκτυα δεδομένων είναι η δυνατότητα να υποστηρίξουν εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο (δίκτυα δεδομένων) ή να υποστηρίξουν χρονικά κρίσιμες εφαρμογές (δίκτυα ελέγχου).

Με τα NCS οι αποφάσεις και οι λειτουργίες ελέγχου (συμπεριλαμβανομένης και της επεξεργασίας

σήματος) μπορούν να διανεμηθούν μεταξύ των υπευθύνων για το δίκτυο κόμβων. Ωστόσο κατά τον σχεδιασμό ενός NCS ο περιορισμός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι το περιορισμένο εύρος ζώνης του δικτύου επικοινωνίας. Το αποτελεσματικότερο εύρος ζώνης ενός δικτύου ορίζεται ως το μέγιστο ποσό των σημαντικών δεδομένων που μπορούν να μεταδοθούν ανά μονάδα χρόνου, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη κεφαλίδες, γεμίσματα, κλπ. Επίσης το εύρος ζώνης του δικτύου είναι ίσο με τον αριθμό των πρώτων bit που μεταδίδονται αν μονάδα χρόνου.

Τέσσερις παράγοντες επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα και τη λειτουργικότητα του εύρους ζώνης του δικτύου:

- Οι ρυθμοί δειγματοληψίας με τους οποίους οι διάφορες συσκευές αποστέλλουν πληροφορίες στο δίκτυο.
- Ο αριθμός των στοιχείων που απαιτούν σύγχρονισμένη λειτουργία.
- Τα δεδομένα ή το μέγεθος των μηνυμάτων των πληροφοριών.
- Το πρωτόκολλο πρόσβασης στο μέσο που ελέγχει τη μετάδοση πληροφοριών.

Επομένως, για να επιτευχθούν οι χρονικοί περιορισμοί και οι υπηρεσίες εγγύησης της απόδοσης του NCS, πρέπει να αναλυθεί η βελτιστοποίηση του δικτύου κυκλοφορίας και ο σχεδιασμός του ελεγκτή για τις συσκευές που συνδέονται στο δίκτυο.

Οι μετρήσεις απόδοσης των συστημάτων δικτύου που επηρεάζουν τις απαιτήσεις των συστημάτων ελέγχου περιλαμβάνουν καθυστέρηση πρόσβασης, χρόνο μετάδοσης, χρόνο απόκρισης, καθυστέρηση μηνύματος, σύγκρουση μηνυμάτων (ποσοστό της σύγκρουσης), διακίνηση μηνυμάτων (ποσοστό των πακέτων που απορρίπτονται), μέγεθος πακέτου, χρησιμοποίηση του δικτύου.

Για τα συστήματα ελέγχου, τα υποψήφια δίκτυα ελέγχου πρέπει να πληρούν δύο βασικά χαρακτηριστικά:

- Την περιορισμένη χρονική καθυστέρηση.
- Την εγγυημένη μετάδοση.

Δηλαδή, ένα μήνυμα για να μεταδοθεί με επιτυχία θα πρέπει να μεταδοθεί μέσα με ένα οριοθετημένο και περιορισμένο χρόνο καθυστέρησης. Ανεπιτυχής μετάδοση ή μεγάλη χρονική καθυστέρηση μηνυμάτων από έναν αισθητήρα σε έναν ενεργοποιητή για παράδειγμα, μπορεί να επιδεινώσει την απόδοση του συστήματος ή να καταστήσει το σύστημα ασταθές. Διάφορα πρωτόκολλα έχουν προταθεί για να πληρούν αυτές τις προϋποθέσεις για τα συστήματα ελέγχου. Σε αυτά περιλαμβάνονται το Ethernet (IEEE 802.3: CSMA/CD), το Token Bus (IEEE 802.4), το Token

Ring (IEEE 802.5) και το CAN (CSMA/AMP).

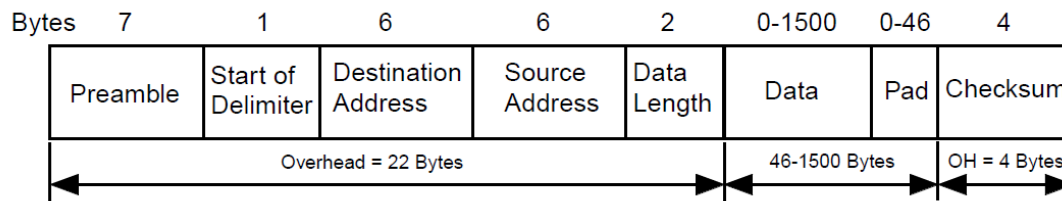
Σε αυτό το κεφάλαιο, αναλύουμε πώς καθένας από αυτούς τους τύπους των δικτύων ελέγχου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως το βασικό στοιχείο της επικοινωνίας για ένα δικτυωμένο σύστημα ελέγχου που συνδέει αισθητήρες, ενεργοποιητές και ελεγκτές. Επίσης γίνεται αναφορά στο πρωτόκολλο του ελέγχου πρόσβασης στο μέσο για κάθε δίκτυο.

## 7.1 Δίκτυα Ελέγχου

Σε αυτή την ενότητα, θα μελετηθεί το Medium Access Control (MAC) πρωτόκολλο υποστρώματος σε τρία δίκτυα ελέγχου: τα Ethernet δίκτυα, τα ControlNet δίκτυα (δίκτυο βασισμένο στο token), και τα DeviceNet δίκτυα (δίκτυο βασισμένο στο CAN). Το MAC πρωτόκολλο υποστρώματος, το οποίο περιγράφει το πρωτόκολλο για την πρόσβαση στο δίκτυο, είναι υπεύθυνο για την τήρηση των απαιτήσεων απάντησης μέσω του δικτύου, για την ποιότητα και για την αξιοπιστία της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων του δικτύου.

### 7.1.1 Ethernet (CSMA/CD)

Το Ethernet χρησιμοποιεί τον μηχανισμό Carrier Sense Multiple Access με Collision Detection (CSMA/CD) για την διαίτησία στο μέσο επικοινωνίας. Το πρωτόκολλο CSMA/CD καθορίζεται στο πρότυπο δικτύου IEEE 802.3. Όταν ένας κόμβος θέλει να μεταδώσει, παρακολουθεί το δίκτυο. Εάν το δίκτυο είναι κατειλημμένο, περιμένει μέχρι το δίκτυο να είναι σε αδράνεια, διαφορετικά μεταδίδει αμέσως. Εάν δύο ή περισσότεροι κόμβοι καταλάβουν την αδράνεια του δικτύου και αποφασίσουν να μεταδώσουν ταυτόχρονα, τα μηνύματα μετάδοσης των συγκεκριμένων κόμβων συγκρούονται και τα μηνύματα καταστρέφονται. Κατά τη μετάδοση, ένας κόμβος πρέπει επίσης να παρακολουθεί και να ανιχνεύσει τυχόν σύγκρουση μηνυμάτων. Με την ανίχνευση μιας σύγκρουσης ανάμεσα σε δύο ή περισσότερα μηνύματα, ο κόμβος σταματά τη μετάδοση και περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα για να επαναλάβει τη μετάδοση. Αυτό το τυχαίο χρονικό διάστημα καθορίζεται από το πρότυπο Binary Exponential Backoff (BEB) αλγόριθμο. Ο χρόνος που χρειάζεται μέχρι την επόμενη προσπάθεια επιλέγεται τυχαία μεταξύ 0 και  $(2^i - 1)$  σχισμών, όπου  $i$  συμβολίζει την  $i$ -οστή περίπτωση σύγκρουσης που ανιχνεύεται από τον κόμβο και μία σχισμή χρόνου είναι ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για μια μετάδοση με 'επιστροφή'. Η μορφή πλαισίου Ethernet απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Η συνολική επιβάρυνση είναι 26 byte.



Εικόνα 23. Ethernet (CSMA/CD) μορφή πλαισίου.

Το μέγεθος του πακέτου δεδομένων πλαισίου είναι μεταξύ 46 και 1500 bytes. Υπάρχει ένα ελάχιστο μη μηδενικό μέγεθος δεδομένων, επειδή το πρότυπο προβλέπει ότι τα ισχύοντα πλαίσια θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 64 bytes από το Destination Address ως το Checksum και 72 bytes συμπεριλαμβανομένου του Preamble και του Start of Delimiter. Αν το τμήμα των δεδομένων ενός πλαισίου είναι μικρότερο από 46 bytes, το Pad χρησιμοποιείται για να γεμίζει το πλαίσιο μέχρι το ελάχιστο μέγεθος. Υπάρχουν δύο λόγοι για αυτό το ελάχιστο όριο μεγέθους.

- Κατ 'αρχάς, είναι πιο εύκολο να διακρίνονται τα έγκυρα πλαίσια από τα άκυρα. Όταν ένας πομποδέκτης ανιχνεύει μια σύγκρουση, περικόπτει το τρέχον πλαίσιο, το οποίο σημαίνει ότι συχνά εμφανίζονται πάνω στο καλώδιο τα αδέσποτα κομμάτια των πλαισίων.
- Δεύτερον, εμποδίζει έναν κόμβο από την ολοκλήρωση της μετάδοσης ενός μικρού πλαισίου πριν το πρώτο bit να έχει φτάσει στο απώτερο άκρο του καλωδίου, όπου μπορεί να συγκρουστεί με ένα άλλο πλαίσιο.

Για παράδειγμα σε ένα δίκτυο Ethernet με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 10Mbps με ένα μέγιστο μήκος 2500 m και τέσσερις επαναλήπτες, ο ελάχιστος επιτρεπόμενος χρόνος πλαισίου ή χρόνος σχισμής είναι 51,2  $\mu$ s, ο οποίος είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάδοση 64 bytes σε 10 Mbps.

**Πλεονεκτήματα:** Λόγω της μικρής κεφαλίδας του μέσου πρόσβασης, το Ethernet χρησιμοποιεί έναν απλό αλγόριθμο για τη λειτουργία του δικτύου και δεν έχει σχεδόν καμία καθυστέρηση σε χαμηλούς φόρτους του δικτύου. Δεν χρησιμοποιείται καθόλου εύρος ζώνης για να αποκτηθεί πρόσβαση στο δίκτυο σε σύγκριση με το token δίκτυο ή το token ring πρωτόκολλο. Το Ethernet χρησιμοποιείται ως ένα δίκτυο ελέγχου και χρησιμοποιεί συνήθως τα 10 Mbps (π.χ., Modbus/TCP). Επίσης, χρησιμοποιείται υψηλής ταχύτητας Ethernet (100 Mbps ή ακόμη και 1 Gbps) κυρίως σε δίκτυα δεδομένων.

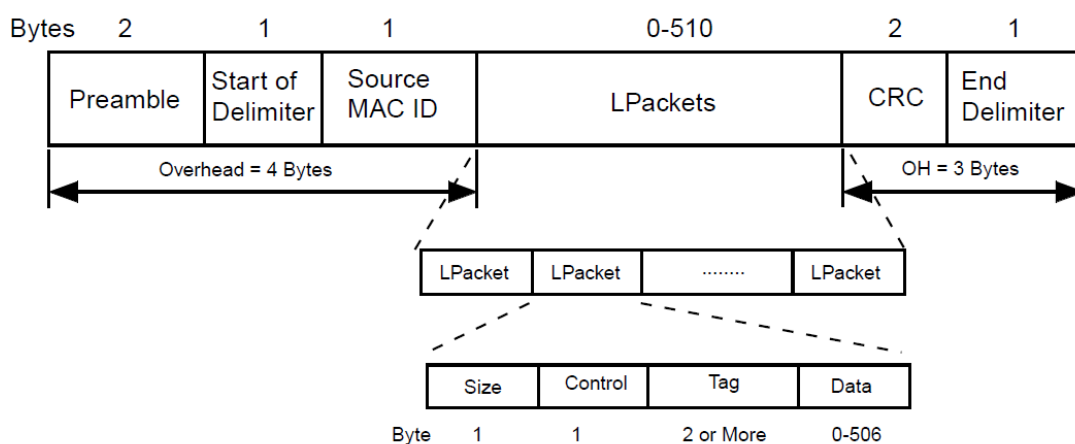
**Μειονεκτήματα:** Το Ethernet είναι ένα μη ντετερμινιστικό πρωτόκολλο και δεν υποστηρίζει ιεράρχηση μηνυμάτων. Στους υψηλούς φόρτους του δικτύου, οι συγκρούσεις μηνυμάτων είναι ένα

μεγάλο πρόβλημα, επειδή επιδρούν σε ένα μεγάλο βαθμό στη διακίνηση των δεδομένων και στη χρονική καθυστέρηση που μπορεί να απεριόριστη. Η Ethernet επίδραση λήψης υπάρχει στο πρότυπο αλγόριθμου BEB, στο οποίο ένας κόμβος μεταδίδει πακέτα αποκλειστικά για ένα παρατεταμένο χρονικό διάστημα, παρόλο που οι άλλοι κόμβοι βρίσκονται σε αναμονή για το μέσο πρόσβασης. Το παραπάνω προκαλεί αδικία και οδηγεί σε σημαντική υποβάθμιση των επιδόσεων. Με βάση τον αλγόριθμο BEB, ένα μήνυμα πρέπει να απορρίπτεται μετά από μια σειρά από συγκρούσεις. Συνεπώς, η απο άκρο σε άκρο επικοινωνία δεν είναι εγγυημένη. Λόγω του απαιτούμενου ελάχιστου έγκυρου μεγέθους πλαισίου, το Ethernet χρησιμοποιεί ένα μεγάλο μέγεθος μηνύματος για να μεταδώσει ένα μικρό ποσό δεδομένων.

Πολλές λύσεις έχουν προταθεί για τη χρήση Ethernet σε εφαρμογές ελέγχου. Για παράδειγμα, κάθε μήνυμα θα μπορούσε να είναι σφραγισμένο με βάση το χρόνο πριν από την αποστολή. Αυτό απαιτεί συγχρονισμό ρολογιού, κάτι που δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί, ιδίως με ένα δίκτυο αυτού του τύπου. Άλλες λύσεις επίσης δίνουν προτεραιότητα στο CSMA/CD (π.χ. LonWorks) για τη βελτίωση του χρόνου απόκρισης των κρίσιμων πακέτων. Ένας άλλος τρόπος για την αύξηση της αποτελεσματικότητας του δικτύου είναι η χρήση Ethernet με μεταγωγείς με σκοπό την υποδιαίρεση της αρχιτεκτονικής του.

### 7.1.2 ControlNet (Token Passing Bus)

Το Manufacturing Automation Protocol (MAP), το Process Field Bus (PROFIBUS), και το ControlNet είναι τα χαρακτηριστικότερα παραδείγματα δικτύων ελέγχου παράδοσης σκυτάλης. Αυτά είναι ντετερμινιστικά δίκτυα, λόγω του ότι ο μέγιστος χρόνος αναμονής πριν από την αποστολή ενός πλαισίου μηνύματος μπορεί να χαρακτηριστεί από το χρόνο περιστροφής της σκυτάλης. Το πρωτόκολλο του δικτύου σκυτάλης (IEEE 802.4) επιτρέπει ένα γραμμικό, πολλαπλών πτώσεων δενδροειδές σχήμα ή μια τετμημένη τοπολογία. Οι κόμβοι στο δίκτυο σκυτάλης διατάσσονται λογικά σε ένα δακτύλιο. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του ControlNet, κάθε κόμβος γνωρίζει τη διεύθυνση τόσο του προκατόχου όσο και του διαδόχου του. Κατά τη λειτουργία του δικτύου, ο κόμβος με τη σκυτάλη μεταδίδει δεδομένα είτε μέχρι να τελειώσουν τα προς μετάδοση πλαίσια δεδομένων είτε μέχρι να τελειώσει ο χρόνος που κατέχει τη σκυτάλη. Στη συνέχεια ο συγκεκριμένος κόμβος παραδίδει τη σκυτάλη στον επόμενο κόμβο του δικτύου. Αν ένας κόμβος δεν έχει κανένα μήνυμα να στείλει, περνά μόνο τη σκυτάλη στον επόμενο κόμβο. Η φυσική θέση του διαδόχου δεν είναι σημαντική, επειδή η σκυτάλη αποστέλλεται στον λογικό γείτονα. Σύγκρουση των δεδομένων πλαισίων δεν μπορεί να συμβεί, καθώς μόνο ένας κόμβος μπορεί να μεταδώσει σε ένα χρονικό διάστημα. Το πρωτόκολλο εγγυάται επίσης ένα μέγιστο χρόνο πρόσβασης στο δίκτυο για κάθε κόμβο και περιλαμβάνει διατάξεις για την ανάπλαση της σκυτάλης, εάν φυσικά ο κάτοχος της σκυτάλης σταματά να μεταδίδει και δεν περνά τη σκυτάλη στο διάδοχο. Επίσης, οι κόμβοι μπορούν να προστεθούν και να αφαιρεθούν δυναμικά στο λογικό δακτύλιο.



Εικόνα 24. Η μορφή πλαισίου του ControlNet (Token Bus).

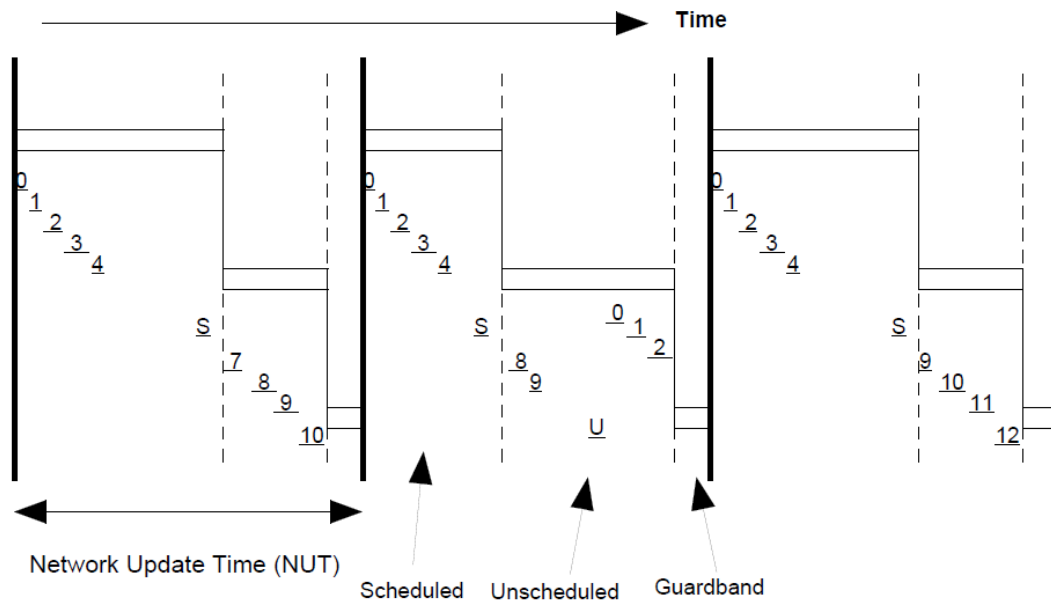
Η μορφή του πλαισίου μηνύματος του ControlNet απεικονίζεται στην εικόνα 24. Η συνολική επιβάρυνση είναι 7 bytes, συμπεριλαμβανομένου του preamble, του start delimiter, του source MAC ID, του CRC (Cyclic Redundancy Check) και του end delimiter. Το πλαίσιο πακέτου δεδομένων ονομάζεται Lpacket ή Link Packet Frame και μπορεί να περιλαμβάνει αρκετά Lpackets τα οποία με τη σειρά τους περιέχουν το μέγεθος, τον έλεγχο, την ετικέτα, τα δεδομένα και μια ατομική διεύθυνση προορισμού με συνολικό μέγεθος πλαισίου μεταξύ 0 και 510 bytes. Το μέγεθος του πεδίου προσδιορίζει τον αριθμό των ζευγών byte (από 3 έως 255) που περιέχονται σε ένα μεμονωμένο Lpacket. Κάθε ζεύγος byte πρέπει να περιλαμβάνει το μέγεθος, τον έλεγχο, την ετικέτα, και τη σύνδεση του πεδίου δεδομένων.

Το πρωτόκολλο ControlNet σύμφωνα με το μηχανισμό παράδοσης σκυτάλης που υιοθετεί εκχωρεί ένα μοναδικό MAC ID (από 1 έως 99) σε κάθε κόμβο. Όπως και στα υπόλοιπα δίκτυα παράδοσης σκυτάλης, ο κόμβος με την σκυτάλη μπορεί να στέλνει δεδομένα, ωστόσο όμως δεν υπάρχει πραγματική σκυτάλη παράδοσης στο δίκτυο. Αντί αυτού, ο κάθε κόμβος ελέγχει την πηγή MAC ID του κάθε πλαισίου μηνύματος που έλαβε. Κατά το τέλος ενός πλαισίου μηνύματος, κάθε κόμβος θέτει ένα "σιωπηρό μητρώο σκυτάλης" στην πηγή MAC ID + 1 που έλαβε. Αν η σιωπηρή σκυτάλη μητρώου είναι ίση με την MAC ID του κόμβου, αυτός ο κόμβος μπορεί πλέον να μεταδώσει μηνύματα. Όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια αξία στην "σιωπηρή σκυτάλη μητρώου" τους, για την αποφυγή των συγκρούσεων με το μέσο. Αν ένας κόμβος δεν έχει δεδομένα να στείλει, στέλνει απλά ένα μήνυμα με ένα άδειο πεδίο Lpacket, που ονομάζεται μηδενικό πλαίσιο.

Το μήκος ενός κύκλου, Network Uppdate Time (NUT) στο ControlNet ή Token Rotation Time (TRT) γενικά, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, χωρίζεται σε τρία μέρη:

- Προγραμματισμένο
- Μη προγραμματισμένο
- Ζώνη φύλαξης





Εικόνα 25. Πρόσβαση στο μέσο κατά το προγραμματισμένο, το μη προγραμματισμένο και το guardband.

Κατά το προγραμματισμένο μέρος ενός NUT, κάθε κόμβος μπορεί να μεταδώσει χρονικά κρίσιμα και προγραμματισμένα δεδομένα αποκτώντας την σιωπηρή σκυτάλη από 0 έως S ( $S = \text{Scheduled}$  όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα).

Κατά τη διάρκεια του μη προγραμματισμένου μέρους ενός NUT, κάθε κόμβος μπορεί να μεταδώσει από 0 έως U χρονικά διαστήματα ( $U = \text{Unscheduled}$  όπως φαίνεται στην εικόνα 25). Μοιράζεται την ευκαιρία να μεταδίδει μη χρονικά κρίσιμα δεδομένα με ένα round robin τρόπο μέχρι η μη προγραμματισμένη διάρκεια να λήξει. Όταν έρχεται ο χρόνος του guardband, όλοι οι κόμβοι σταματούν τη μετάδοση και μόνο ο κόμβος με τη χαμηλότερη MAC ID που ονομάζεται μεσολαβητής, μπορεί να μεταδώσει ένα μήνυμα συντήρησης. Το συγκεκριμένο μήνυμα συντήρησης ονομάζεται πλαίσιο μεσολαβητή και επιτυγχάνει τον συγχρονισμό όλων των χρονομέτρων στο εσωτερικό κάθε κόμβου και τη δημοσίευση των κρίσιμων παραμέτρων, όπως της σύνδεσης NUT, του κόμβου φοράς, S, U, κλπ. Αν το πλαίσιο μεσολαβητή δεν ακούγεται για δύο συνεχόμενους NUT, τότε ο κόμβος με το χαμηλότερο MAC ID θα ξεκινήσει τη μετάδοση του πλαισίου μεσολαβητή στο guardband του τρίτου NUT. Επιπλέον, αν ένας μεσολαβητής κόμβος παρατηρήσει ότι ένας άλλος κόμβος έχει χαμηλότερη MAC ID από τη δική του, ακυρώνει αμέσως το μεσολαβητικό ρόλο του.

**Πλεονεκτήματα:** Το πρωτόκολλο του δικτύου σκυτάλης είναι ένα ντετερμινιστικό πρωτόκολλο

που παρέχει εξαιρετική απόδοση και αποτελεσματικότητα σε υψηλούς φόρτους του δικτύου. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του δικτύου, το Token Bus μπορεί δυναμικά είτε να προσθέτει κόμβους ή να τους αφαιρεί από το δίκτυο. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την περίπτωση του Token Ring, όπου εκεί οι κόμβοι σχηματίζουν ένα δακτύλιο και δεν μπορούν να προστεθούν ή να αφαιρεθούν δυναμικά. Προγραμματισμένα και μη τμήματα σε κάθε κύκλο NUT κάνουν το ControlNet κατάλληλο για χρονικά κρίσιμα και μη χρονικά κρίσιμα μηνύματα.

**Μειονεκτήματα:** Αν και το πρωτόκολλο του δικτύου σκυτάλης είναι αποτελεσματικό και ντετερμινιστικό σε υψηλούς φορτους δικτύου, σε χαμηλή κυκλοφορία καναλιού, η απόδοσή του δεν ταιριάζει με αυτή των ισχυρισμών του πρωτοκόλλου. Σε γενικές γραμμές, όταν υπάρχουν πολλοί κόμβοι σε ένα λογικό δακτύλιο, ένα μεγάλο ποσοστό του χρόνου του δικτύου χρησιμοποιείται στο πέρασμα της σκυτάλης μεταξύ των κόμβων όταν η κυκλοφορία των δεδομένων είναι χαμηλού φόρτου.

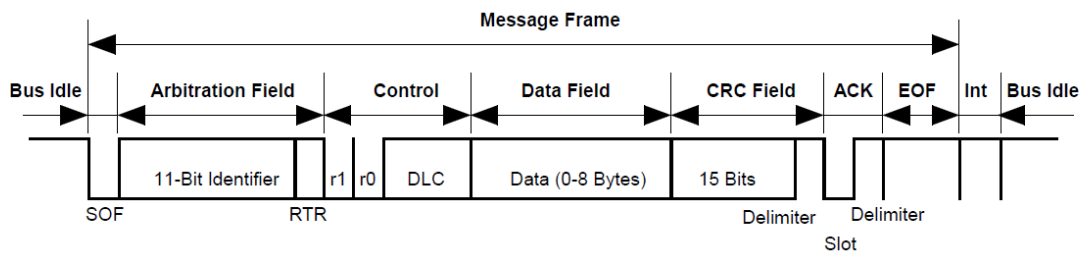
### 7.1.3 DeviceNet (CANbus)

Το CAN είναι ένα σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας που αναπτύχθηκε κυρίως για εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία. Επίσης είναι σε θέση να προσφέρει καλή απόδοση και σε άλλες βιομηχανικές εφαρμογές. Το πρωτόκολλο CAN έχει βελτιστοποιηθεί για μικρά και σύντομα μηνύματα και χρησιμοποιεί την Carrier Sense Multiple Access με Arbitration Message Priority (CSMA/AMP) μέθοδο προσπέλασης μέσου. Έτσι το πρωτόκολλο είναι προσανατολισμένο στο μήνυμα. Κάθε μήνυμα έχει μια προδιαγεγραμμένη προτεραιότητα που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία διαιτησίας πρόσβασης στο δίκτυο στην περίπτωση της ταυτόχρονης μετάδοσης. Η ροή μετάδοσης είναι συγχρονισμένη στο το bit έναρξης και η διαιτησία γίνεται στη συνέχεια του μηνύματος με το ID, κατά την οποία ένα λογικό μηδέν είναι κυρίαρχο σε σχέση με το λογικό ένα. Ένας κόμβος που θέλει να μεταδώσει ένα μήνυμα περιμένει μέχρι το δίκτυο να είναι ελεύθερο και στη συνέχεια αρχίζει να στέλνει το ID του μηνύματός του. Σε περίπτωση διαμάχης για την πρόσβαση στο δίκτυο, τα προβλήματα επιλύονται κατά τη μετάδοση από μια διαδικασία διαιτησίας σε επίπεδο bit, το οποίο είναι στο αρχικό μέρος κάθε πλαισίου. Ως εκ τούτου, αν δύο συσκευές θέλουν να στείλουν μηνύματα την ίδια στιγμή, αρχικά συνεχίζουν να στέλνουν τα πλαίσια του μηνύματος και στη συνέχεια παρακολουθούν το δίκτυο. Αν μια από αυτές δεχθεί ένα bit διαφορετικό από εκείνο που έχει στείλει, τότε χάνει το δικαίωμα να συνεχίσει να στέλνει το μήνυμά της και η άλλη κερδίζει τη διαιτησία. Με αυτή τη μέθοδο, μια συνεχιζόμενη μετάδοση ποτέ δεν καταστρέφεται.

Σε ένα CAN δίκτυο, τα δεδομένα μεταδίδονται και λαμβάνονται μέσω πλαισίων που μεταφέρουν δεδομένα από ένα κόμβο μετάδοσης σε έναν ή περισσότερους κόμβους υποδοχής. Τα μεταδιδόμενα δεδομένα δεν περιέχουν απαραίτητα διευθύνσεις της πηγής ή του προορισμού του μηνύματος. Αντί αυτού, κάθε μήνυμα σημαίνεται από ένα ID που είναι μοναδικό σε ολόκληρο το δίκτυο. Όλοι οι άλλοι κόμβοι του δικτύου λαμβάνουν το μήνυμα και είτε το αποδέχονται είτε το απορρίπτουν ανάλογα με τη διαμόρφωση των φίλτρων για το ID. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας είναι γνωστός ως πολυεκπομπή.

Το DeviceNet, το οποίο βασίζεται στο πρότυπο CAN, είναι μια σχετικά χαμηλού κόστους επικοινωνία που επιτρέπει τη σύνδεση συσκευών σε ένα δίκτυο. Γνωρίζει επίσης σημαντική αποδοχή σε επίπεδο συσκευών στις βιομηχανικές εφαρμογές. Η μορφή πλαισίου του DeviceNet απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Η συνολική επιβάρυνση είναι 47 bit, η οποία περιλαμβάνει την έναρξη του πλαισίου (SOF), τη διαιτησία (11bit ID), τον έλεγχο, CRC, την αναγνώριση (ACK),

το τέλος του πλαισίου (EOF) και το πεδίο διάκοπής (INT). Το μέγεθος του πεδίου δεδομένων είναι μεταξύ 0 και 8 bytes. Το πρωτόκολλο DeviceNet χρησιμοποιεί το πεδίο διαιτησίας για να παρέχει διευθυνσιοδότηση στην πηγή και στον προορισμό καθώς και ιεράρχηση μηνυμάτων.



Εικόνα 26. Η μορφή πλαισίου του DeviceNet (πρότυπο CAN).

**Πλεονεκτήματα:** Το CAN είναι ένα ντετερμινιστικό πρωτόκολλο βελτιστοποιημένο για σύντομα μηνύματα. Η προτεραιότητα του μηνύματος καθορίζεται στο πεδίο της διαιτησίας (11 bits ID). Τα υψηλότερης προτεραιότητας μηνύματα αποκτούν πάντα πρόσβαση στο μέσο κατά τη διαιτησία σε σχέση με τα χαμηλότερης προτεραιότητας. Συνεπώς, ο χρόνος καθυστέρησης της μετάδοσης στα υψηλότερης προτεραιότητας μηνύματα είναι εγγυημένη.

**Μειονεκτήματα:** Το κύριο μειονέκτημα του δικτύου CAN σε σύγκριση με τα άλλα είναι ο αργός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (κατ'ανώτατο όριο των 1 Mbps). Έτσι, η απόδοση είναι περιορισμένη σε σύγκριση με τα άλλα δίκτυα ελέγχου. Η απαίτηση συγχρονισμού στα bit του πρωτοκόλλου CAN περιορίζει επίσης το μέγιστο μήκος του δικτύου. Τέλος το CAN επίσης δεν είναι κατάλληλο για τη μετάδοση μηνυμάτων μεγάλου μεγέθους.

## 8 Κατανεμημένα Συστήματα Ελέγχου

### 8.1 Ορισμός

Στην τεχνολογία Ελέγχου Διεργασιών διακρίνουμε τα Συστήματα Ανοιχτού Ελέγχου, τα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου και τα Συστήματα Κατανεμημένου Ελέγχου [25], [28].

Στα Συστήματα Ανοιχτού Ελέγχου το σήμα εξόδου ρυθμίζεται σε μια επιθυμητή τιμή με τη βοήθεια ενός εξωτερικού σήματος. Στα συστήματα αυτά η απόκλιση από την επιθυμητή τιμή (σφάλμα) δεν είναι δυνατό να εξουδετερωθεί.

Αντίθετα στα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου (κλειστό σύστημα) η ελεγχόμενη μεταβλητή (σήμα εξόδου) μετρίεται και συγκρίνεται συνεχώς με την επιθυμητή τιμή με σκοπό να μηδενιστεί το σφάλμα (ανατροφοδότηση).

Στα Κατανεμημένα Συστήματα Ελέγχου ο έλεγχος γίνεται από έναν κεντρικό υπολογιστή, ο οποίος εποπτεύει την ασφαλή, οικονομική και τεχνικά σωστή λειτουργία του συστήματος. Το κύριο χαρακτηριστικό των κατανεμημένων συστημάτων είναι ότι αποτελούνται από τοπικούς ελεγκτές βασισμένους σε μικροεπεξεργαστές. Ο κάθε τοπικός ελεγκτής υλοποιεί αυτόνομα το βρόχο αυτομάτου ελέγχου του τμήματος της εγκατάστασης που ελέγχει και όλοι οι τοπικοί ελεγκτές είναι συνδεδεμένοι σε δίαυλο προκειμένου να επικοινωνούν. Στο δίαυλο είναι επίσης συνδεδεμένοι οι Η/Υ που χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση όλης της εγκατάστασης και την εισαγωγή εντολών ελέγχου.

Η έννοια της κατανομής λειτουργιών ή δραστηριοτήτων προέρχεται από την τεχνολογία των υπολογιστών.

Τα υπολογιστικά συστήματα τυπικά ρυθμίζονται χρησιμοποιώντας έναν από τους τέσσερις διαφορετικούς τύπους οργάνωσης.

- Το σύστημα θα πρέπει να έχει μία πολύ μεγάλη κεντρική μηχανή (όπως μια κεντρική μονάδα) με ευφυή τερματικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσπελαστούν δεδομένα ή λειτουργίες σε αυτή την μηχανή. Αφού οι περισσότερες εταιρείες και πανεπιστήμια χρησιμοποίησαν αυτή την οργάνωση κατά τη διάρκεια της δεκαετίας 1970 και 1980, η χρήση της κεντρικής επεξεργασίας έχει μειωθεί δραματικά.
- Μια εναλλακτική προσέγγιση για την κεντρική επεξεργασία είναι αυτή της ολοκληρωτικής αποκέντρωσης της επεξεργασίας, όπου ένας μεγάλος αριθμός μικρών μονάδων (όπως επιτραπέζιες μηχανές) επιτελούν ανεξάρτητες λειτουργίες με πολύ μικρή διάδραση. Αυτό

παρέχει μεγάλη ευελιξία για ανεξάρτητους χρήστες, αλλά κάνει την κοινή χρήση δεδομένων δύσκολη.

- Μια τρίτη πιθανή οργάνωση είναι ιεραρχική, όπου ενσωματωμένες σχετικά όμοιες μικρής κλίμακας μονάδες μέσω μιας κεντρικής μηχανής (server) επιτελούν πολλές λειτουργίες υψηλού επιπέδου. Αυτή η οργάνωση επιτελείται συχνά σε υπολογιστικά συγκροτήματα πανεπιστημίων. Επίσης χρησιμοποιείται σε εφαρμογές Web όπου ο Web server είναι η κεντρική μηχανή και πελάτες είναι οι απομακρυσμένες μηχανές που συνδέονται στον Web server για να προσπελάσουν δεδομένα.
- Ο τέταρτος τρόπος οργάνωσης για υπολογιστικά συστήματα είναι καταναμητικός. Κάθε υπολογιστής επιτελεί λειτουργίες ζωτικές για την συνολική λειτουργία και ενσωματώνεται με τις άλλες μηχανές του συστήματος. Διαφοροποιείται από την αποκεντρωμένη διαδικασία στην οποία οι μηχανές είναι περισσότερο στενά συνδεδεμένες σε ολοκληρωμένες εργασίες υψηλού επιπέδου. Είναι μια εξομαλυντική αρχιτεκτονική όπου η ιεραρχία από τις λειτουργίες επιτελείται από ανεξάρτητους επεξεργαστές και όχι από μια κεντρική μηχανή υψηλού επιπέδου.

Η καταναμημένη επεξεργασία μπορεί να θεωρηθεί σαν μια μορφή παράλληλης επεξεργασίας, εκτός της επεξεργασίας που μπορεί να καταναμηθεί σε ξεχωριστούς υπολογιστές, όχι απλά σε ξεχωριστούς επεξεργαστές. Ένα παράδειγμα από τον επιχειρηματικό κόσμο είναι αυτό στο οποίο μια επιχείρηση έχει έναν μεγάλης κλίμακας υπολογιστή για το marketing, έναν για απογραφή (συμπεριλαμβανομένης μεταφοράς και λήψης) και έναν για την λογιστική. Ασφαλώς, όλες αυτές οι μηχανές πρέπει να επιτελέσουν διαφορετικές λειτουργίες και ακόμα πρέπει να είναι ενωμένες για να μοιράζονται δεδομένα. Ένας πελάτης που βάζει μια παραγγελία στο σύστημα δεν αντιλαμβάνεται ότι χρησιμοποιεί τρεις διαφορετικούς υπολογιστές που δουλεύουν μαζί για να εκτελέσουν την παραγγελία. Η υπολογιστική κατανομή είναι πιο δυναμική από την χρήση κεντρικής ή ιεραρχικής αρχιτεκτονικής αφού μια μηχανή μπορεί να καταρρεύσει χωρίς να αναστατώσει τις λειτουργίες που επιτελούνται σε άλλες μηχανές. Επίσης, μπορούν να εκτελεστούν αναβαθμίσεις με πιο προσαρμοστικό τρόπο και έτσι θα είναι λιγότερο αποδιοργανωτικές και γίνονται σε μικρότερα κομμάτια. Ο καταναμημένος υπολογισμός έχει κερδίσει την αποδοχή, αρχικά λόγω των πλεονεκτημάτων στην επικοινωνία των δικτύων όπου η μεταφορά δεδομένων γίνεται γρήγορα και αξιόπιστα και λόγω των πλεονεκτημάτων στην δημιουργία υλικολογισμικού, όπου κρύβονται οι χαμηλού επιπέδου λεπτομέρειες σχετικά με τον προγραμματισμό του δικτύου. Ως

αποτέλεσμα, οι καταναμημένες αρχιτεκτονικές είναι πλέον πιο κοινές για υπολογιστικά συστήματα στις επιχειρήσεις, στα πανεπιστήμια και στην κυβέρνηση.

Ο καταναμημένος υπολογισμός είναι επίσης ιδανικός για σύνθετα συστήματα ελέγχου. Αυτά τα συστήματα τυπικά έχουν πολλαπλούς επεξεργαστές, όπου ο καθένας επιτελεί ξεχωριστές λειτουργίες που πρέπει να ολοκληρωθούν. Μπορεί να υπάρχουν πολλαπλοί επεξεργαστές στο ταμπλό του οχήματος: ένας για τα ηλεκτρονικά συστήματα (που περιέχει οδηγούς αισθητήρα, ενεργοποιητή και επεξεργαστή αισθητήρα), έναν για χαμηλού επιπέδου λειτουργία ελέγχου (όπως αύξηση της σταθερότητας) και έναν για υψηλού επιπέδου λειτουργίες ελέγχου (όπως σχεδιασμό τροχιάς και ανίχνευση λαθών). Ο επεξεργαστής ελέγχου της αποστολής τοποθετείται μακριά, είτε στο έδαφος ή σε άλλο όχημα (ίσως στο όχημα ανεφοδιασμού). Οι επεξεργαστές που είναι στο όχημα συνδέονται μέσω μιας LAN, ενώ ο απομακρυσμένος επεξεργαστής συνδέεται μέσω μιας ασύρματης σύνδεσης (όπως Ethernet για κοντινή εμβέλεια ή σειριακά για μεγαλύτερη εμβέλεια).

## **8.2 Χαρακτηριστικά Καταναμημένων Συστημάτων Ελέγχου**

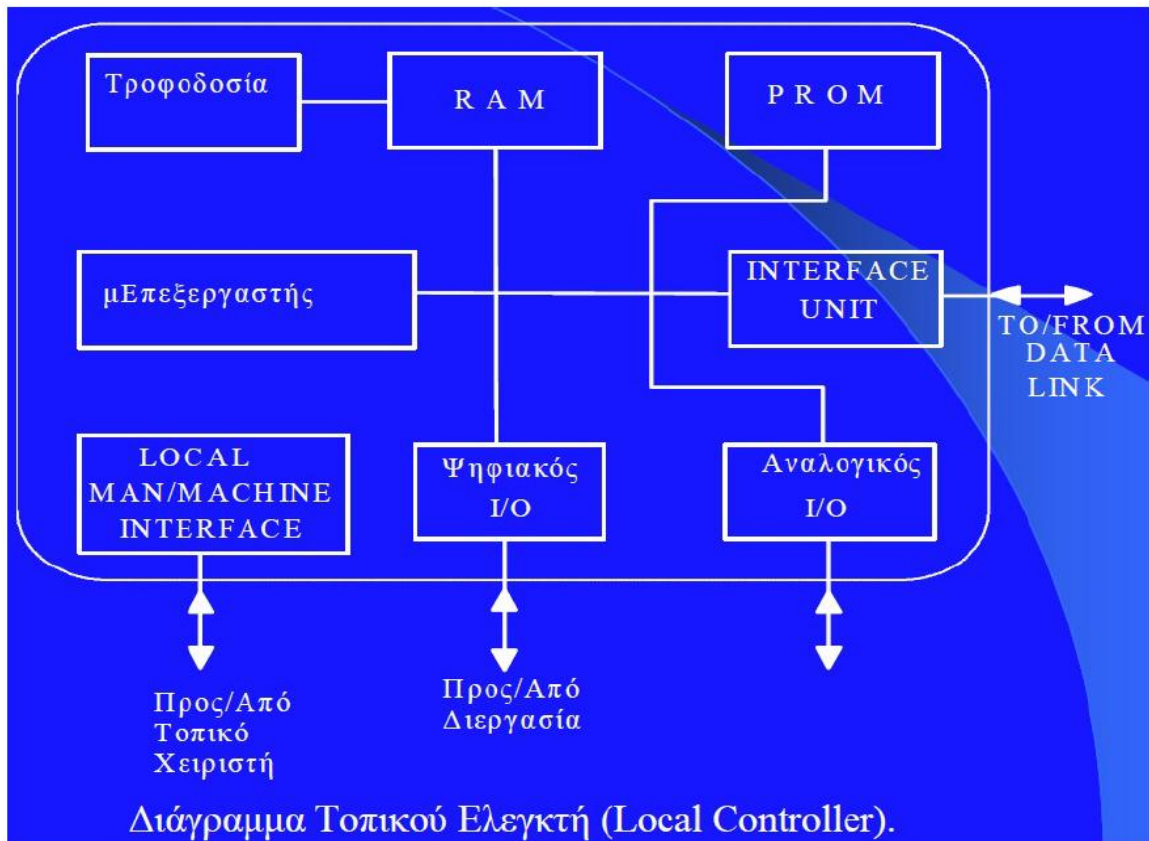
Τα Καταναμημένα Συστήματα Ελέγχου (Distributed Control Systems) αποτελούνται από τρία κύρια μέρη:

- Τα κέντρα ελέγχου.
- Τις μονάδες επικοινωνίας ανθρώπου μηχανής (Human Machine Interface).
- Την επικοινωνία (databus) που συνδέει τα μέρη αυτά μεταξύ τους.

Σε ανώτερο επίπεδο, υπάρχει ένας επιβλέπων H/Y (supervisor) για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας.

Τα κύρια μέρη ενός δικτύου είναι:

- Τοπικοί Ελεγκτές (Local Controllers) ή ελεγκτές πεδίου. Κάθε τοπικός ελεγκτής έχει δυνατότητα να ελέγχει συγχρόνως μερικούς βρόγχους.
- Ψηφιακές συνδέσεις (Data - links) μαζί με τα πρωτόκολλα επικοινωνίας.
- Τουλάχιστον ένας συντονιστή ή επόπτης ελεγκτής.
- Μια κεντρική μονάδα απεικόνισης πληροφοριών.

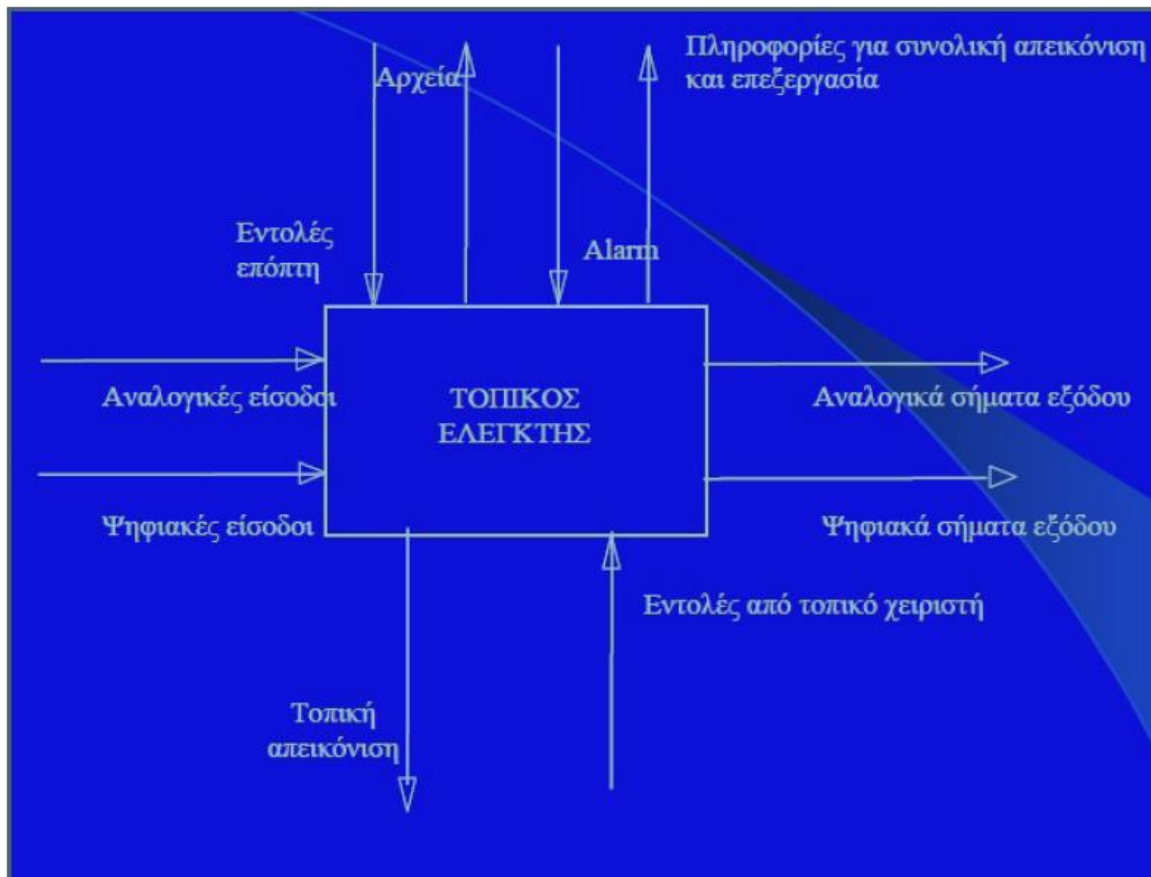


Εικόνα 27. Διάγραμμα τοπικού ελεγκτή.

Οι παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν κατά τον σχεδιασμό είναι οι ακόλουθοι:

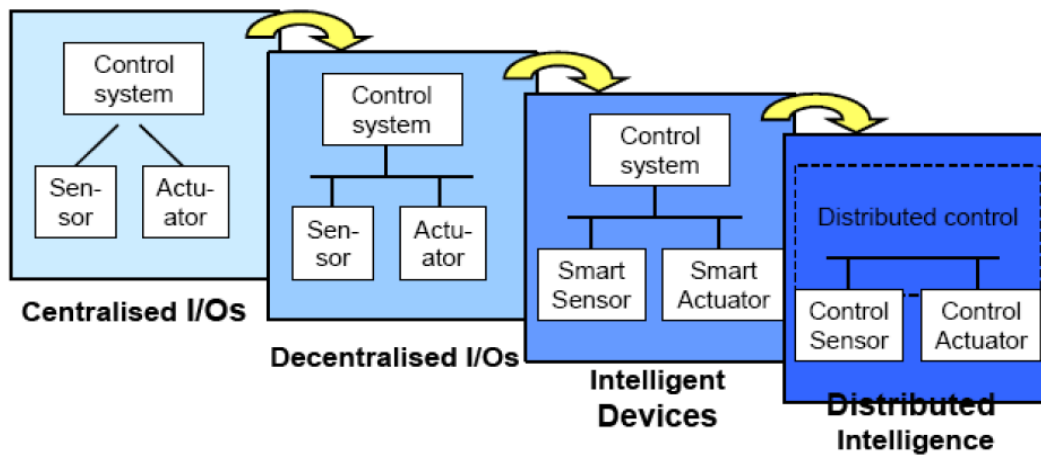
- Μέγιστος αριθμός βρόχων.
- Μέγιστη δυνατή συχνότητα δειγματοληψίας.
- Τύποι και τιμές σημάτων εισόδου / εξόδου.
- Βαθμός αυτονομίας του τοπικού ελεγκτή που απαιτείται.
- Μέθοδος επικοινωνίας τοπικού χειριστή.
- Βαθμός αυτοδιάγνωσης και αυτοεπισκευής.
- Βαθμός φιλικότητας για τον χειριστή χωρίς ειδικές γνώσεις (end user).
- Επίπεδο επικοινωνίας του hardware και software μέσα στον ελεγκτή και μεταξύ άλλων ελεγκτών.





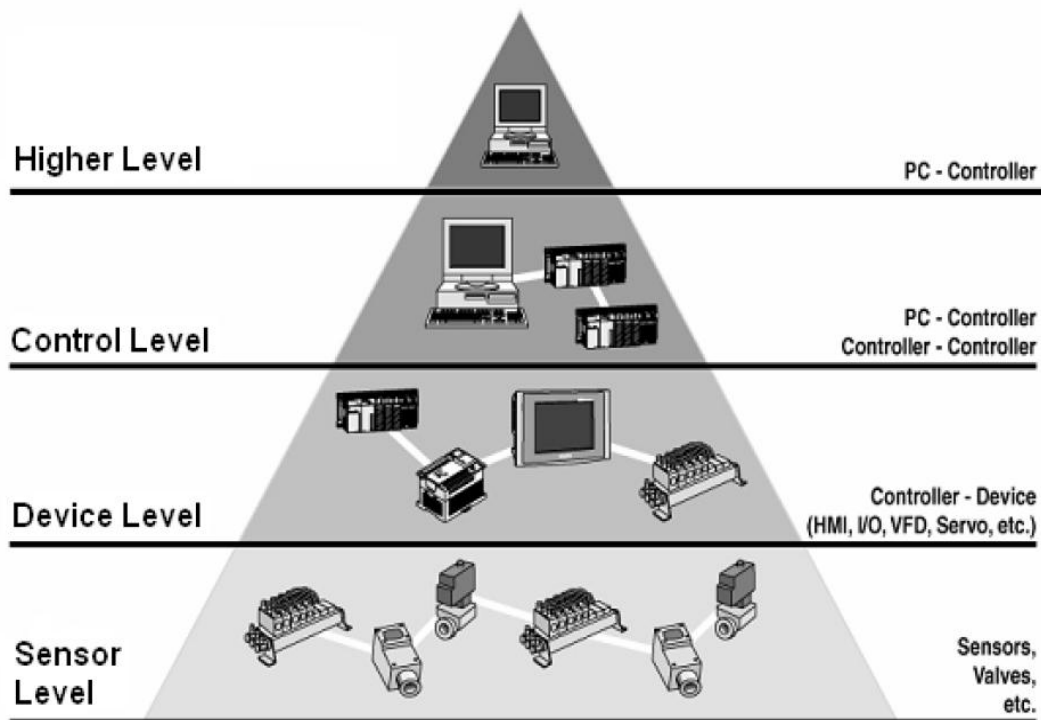
Εικόνα 28. Λειτουργικές εντολές τοπικού ελεγκτή.

Ουσιαστικά, ο όρος κατανεμημένο σύστημα ελέγχου (DCS) αναφέρεται σε ένα σύστημα ελέγχου που αποτελεί μέρος ενός συστήματος μεταποίησης, μιας διαδικασίας ή ενός άλλου δυναμικού συστήματος, στο οποίο τα στοιχεία ελέγχου δεν είναι γεωγραφικά συγκεντρωμένα αλλά κατανεμημένα, με τα επί μέρους υποσυστήματα να ελέγχονται από έναν ή περισσότερους ελεγκτές. Το σύστημα των ελεγκτών συνδέεται μέσω δικτύων. Τα βήματα μετάβασης από συγκεντρωμένα σε κατανεμημένα συστήματα ελέγχου φαίνονται στην εικόνα 29.



Εικόνα 29. Βήματα μετάβασης από συγκεντρωμένα σε κατανεμημένα συστήματα ελέγχου.

Επίσης, η ιεραρχία των κατανεμημένων συστημάτων ελέγχου μπορεί να συνοψισθεί στην εικόνα 30.



Εικόνα 30. Ιεραρχία κατανεμημένων συστημάτων ελέγχου.

### **8.3 Μεθοδολογίες Σχεδίασης ενός Κατανεμημένου Συστήματος Ελέγχου**

Οι μεθοδολογίες σχεδίασης ενός κατανεμημένου συστήματος ελέγχου είναι οι εξής:

- Αντικειμενοστρεφείς
- Αντικειμενοστρεφείς πραγματικού χρόνου
- Ανάπτυξης
- Πρακτόρων λογισμικού

### **8.4 Αντικειμενοστρεφείς (Object Oriented)**

#### **8.4.1 Unified Modelling Language (UML)**

Ορίζει ένα σύνολο διαγραμμάτων που δείχνουν τις συσχετίσεις μεταξύ των αντικειμένων ενός συστήματος. Τα διαγράμματά της ομαδοποιούνται σε δομικά και συμπεριφορικά. Δομικά διαγράμματα αποτελούν τα διαγράμματα κλάσεων, συνεργασιών, στοιχείων και ανάπτυξης. Τα συμπεριφορικά διαγράμματα περιλαμβάνουν διαγράμματα χρήσης (use case), ακολουθιακά, καταστάσεων και ενεργειών [74].

#### **8.4.2 Rational Unified Process (RUP)**

Δίνει βασικές στρατηγικές σχεδίασης για την αντιμετώπιση κινδύνων κατά τη σχεδίαση προερχόμενων από την ύπαρξη σημαντικής ετερογένειας, ακαθορίστων απαιτήσεων ή μεγάλης πολυπλοκότητας [75].

#### **8.4.3 Ευέλικτη ανάπτυξη**

- eXtreme Programming (XP) είναι μια μεθοδολογία ανάπτυξης λογισμικού η οποία αποσκοπεί στη βελτίωση της ποιότητας του λογισμικού και την ανταπόκριση στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις των πελατών. Ως είδος της ευέλικτης ανάπτυξης λογισμικού, τάσσεται υπέρ των συχνών “απελευθερώσεων” λογισμικού, το οποίο έχει ως στόχο να βελτιώσει την παραγωγικότητα και την εισαγωγή νέων σημείων ελέγχου, ανάλογα με τις νέες απαιτήσεις των πελατών που μπορεί να έχουν διαμορφωθεί [76].
- SCRUM “συνωστισμός” είναι ένα ευέλικτο και επαναληπτικό πλαίσιο ανάπτυξης

λογισμικού για τη διαχείριση έργων λογισμικού και προϊόντων ή την ανάπτυξη εφαρμογών. Εστιάζει κυρίως σε μια ευέλικτη και ολοκληρωμένη στρατηγική για την ανάπτυξη του προϊόντος, όπου η ομάδα ανάπτυξης εργάζεται ως μονάδα για την επίτευξη ενός κοινού στόχου [77].

- Feature Driven Development (FDD) είναι μια επαναληπτική και σταδιακή διαδικασία ανάπτυξης λογισμικού, που συνδυάζει μια σειρά από διεθνώς αναγνωρισμένες και βέλτιστες πρακτικές. Αποτελεί επίσης είδος της ευέλικτης ανάπτυξης λογισμικού. Ο κύριος σκοπός του είναι να προσφέρει συγκεκριμένο και λειτουργικό λογισμικό σε συγκεκριμένο χρόνο [78].
- Dynamic System Development Method (DSDM) είναι ένα ευέλικτο πλαίσιο παράδοσης ενός έργου, κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται ως μέθοδος ανάπτυξης λογισμικού. Είναι μια επαναληπτική και αυξητική προσέγγιση που υιοθετεί τις αρχές της ευέλικτης ανάπτυξης, συμπεριλαμβανομένης της συνεχούς χρήσης και της συμμετοχή του πελάτη [79].

#### **8.4.4 OMG Model Driven Architecture (MDA)**

Η OMG MDA αποσκοπεί στην εφαρμογή τεχνολογιών μοντελοποίησης προκειμένου να αντιμετωπιστούν μία σειρά θεμάτων, όπως η μεγάλη ετερογένεια πλατφορμών, ο πολλαπλασιασμός των συστατικών στοιχείων ενός συστήματος, η πληθώρα περιβαλλόντων κατανεμημένης υποδομής, κλπ. Αναπτύσσεται ένα μοντέλο UML της εφαρμογής ανεξάρτητης πλατφόρμας (PIM) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από διαφορετικές ιδίου τύπου πλατφόρμες ανάπτυξης [80].

## **8.5 Αντικειμενοστραφείς μεθοδολογίες μοντελοποίησης πραγματικού χρόνου**

### **8.5.1 ROOM**

Αντικειμενοστραφής μεθοδολογία για συστήματα πραγματικού χρόνου που αναπτύχθηκε αρχικά από την Bell - Northern Research. Βασίζεται στην ιδέα της χρήσης του ιδίου μοντέλου σε όλες τις φάσεις της διαδικασίας ανάπτυξης. Τα μοντέλα ROOM αποτελούνται από actors που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω πρωτοκόλλων. Υπάρχει ιεραρχική σύνθεση των actors, και οι συμπεριφορές τους περιγράφονται από διαγράμματα ROOM.

### **8.5.2 OCTOPUS**

Η Octopus / UML αποτελεί μία αντικειμενοστραφή μεθοδολογία ανάπτυξης λογισμικού ειδικευμένη σε ενσωματωμένα συστήματα πραγματικού χρόνου, που έχει αναπτυχθεί και υποστηρίζεται από τη Nokia [81]. Ο στόχος της μεθόδου είναι η δημιουργία μοντέλων που επεξεργάζονται λεπτομερειακώς θέματα όπως:

- Κλάσεις και αντικείμενα.
- Δομή.
- Συμπεριφορά και σκοπό αυτών των αντικειμένων και κλάσεων.
- Δομή και δυναμική των σχέσεων μεταξύ αντικειμένων.
- Δομικές συσχετίσεις μεταξύ κλάσεων.
- Ομαλή μετάβαση από αντικείμενα και κλάσεις σε έργα και διαδικασίες.

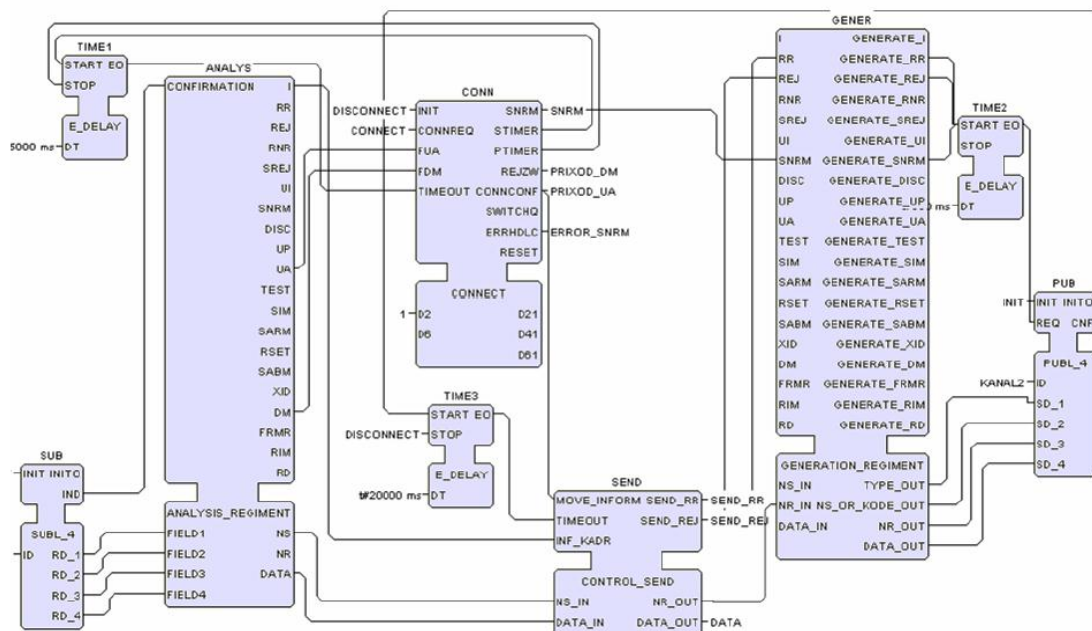
### 8.5.3 ROPES

Η ROPES έχει αρχικά αναπτυχθεί από την Bruce Powel Douglass και υποστηρίζεται από το εργαλείο σχεδίασης Rhapsody της I-Logix. Το εν λόγω σχεδιαστικό εργαλείο αφορά στην ικανοποίηση των προδιαγραφών τους. Αυτές περιλαμβάνουν λογικές απαιτήσεις, απαιτήσεις ανάπτυξης και απαιτήσεις λειτουργίας [82].

## 8.6 Μεθοδολογίες ανάπτυξης καταναμημένων συστημάτων ελέγχου

### 8.6.1 IEC 61499

Η IEC 61499 ορίζει την αρχιτεκτονική και το μοντέλο συναρτήσεων (Function Block -FB) για συστήματα καταναμημένου ελέγχου. Ορίζει τα FB ως το βασικό δομικό στοιχείο για τον ορισμό εφαρμογών μέσω ενός Function Block Diagram (FBD). Παρέχει πιο ισχυρούς μηχανισμούς από το πρότυπο IEC 61131-3 όσον αφορά σε θέματα επικοινωνιών και θέματα πραγματικού χρόνου, που είναι σημαντικά για βιομηχανικά συστήματα. Διάφορα επίπεδα αφαιρετικότητας υποστηρίζονται μέσω των σύνθετων FB, ενώ η XML αποτελεί την πρότυπη περιγραφή των FB. Ο αλγόριθμος εκτέλεσης ελέγχου του FB περιγράφεται από το Execution Control Chart (ECC), ενώ μπορεί να εκτελείται σε ολοκληρωμένο κώδικα (π.χ. Java, C, κλπ) [83], [84].



Εικόνα 31. Το IEC 61499.

### 8.6.2 IDA Architecture Model

Το IDA Application Model βασίζεται στην αρχιτεκτονική αναφοράς του IEC61499, με στόχο την παραγωγή κανόνων για τη δημιουργία μιας κοινής μορφής δεδομένων για συστήματα διαφορετικών κατασκευαστών [85].

### 8.6.3 PROFINet Engineering Model

Πρόταση του Profibus User Organization για να επιτευχθεί ανοικτή κατανεμημένη αυτοματοποίηση. Υιοθετεί τα πρωτόκολλα Ethernet, TCP/IP, και DCOM [86].

### 8.6.4 TORERO

Οι λειτουργίες ελέγχου κατανέμονται σε στοιχειώδεις συσκευές που έχουν την κατάλληλη αρχιτεκτονική για να το υποστηρίξουν TORERO Devices (TDs). Η βασική ιδέα του TORERO αφορά στην κατανομή του ελέγχου υψηλού επιπέδου και στην υλοποίηση ελέγχου χαμηλού επιπέδου.

## **8.7 Μεθοδολογίες πρακτόρων (Agent) λογισμικού**

### **8.7.1 GAIA**

Η Gaia αποτελεί μεθοδολογία η οποία έχει σχεδιαστεί αποκλειστικά για την ανάλυση και σχεδίαση συστημάτων βασισμένων σε πράκτορες λογισμικού. Κατανεμημένα βιομηχανικά συστήματα μεγάλης κλίμακας, αυξημένης πολυπλοκότητας και ετερογένειας, αποτελούν το πεδίο εφαρμογής της μεθοδολογίας. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας θεωρεί τους πράκτορες λογισμικού καλά ορισμένα υπολογιστικά συστήματα που κάνουν χρήση υπολογιστικών πόρων [87].

### **8.7.2 Prometheus**

Ο Prometheus αποτελεί μία μεθοδολογία για την ανάπτυξη συστημάτων ευφυών πρακτόρων. Ορίζει μία γλώσσα μοντελοποίησης που είναι γενική σε αρχιτεκτονικές και περιβάλλοντα ανάπτυξης πολύπρακτορικών συστημάτων [88].

### **8.7.3 FIPA AUML**

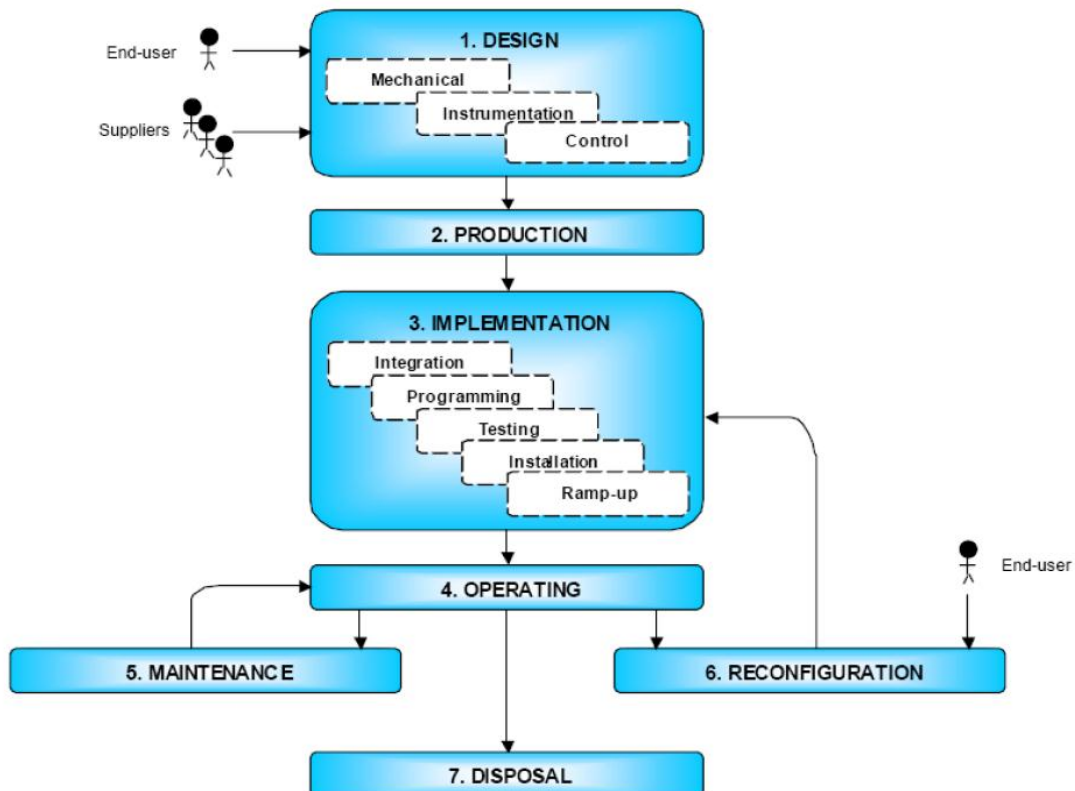
Η FIPA AUML αποτελεί μία ενοποιημένη πρότυπη γλώσσα μοντελοποίησης για συστήματα πρακτόρων [89].



### 8.8 Εξοπλισμός πεδίου και ελεγκτικός εξοπλισμός ενός καταναμημένου συστήματος

Ο κύκλος ζωής ενός καταναμημένου συστήματος αποτελείται κατά κύριο λόγο από τα εξής:

- Σχεδίαση
- Παραγωγή
- Υλοποίηση
- Λειτουργία
- Συντήρηση
- Ανακαθορισμός
- Θέση εκτός λειτουργίας



Εικόνα 32. Κύκλος ζωής καταναμημένου συστήματος.

### 8.8.1 Συμπεριφορά εντός κατανεμημένων συστημάτων

- Δυνατότητες δικτύωσης και υπολογιστικές δυνατότητες για δυναμικό ανακαθορισμό / συντήρηση με μειωμένο κόστος.
- Δυνατότητες Plug & Play.
  1. Ανακάλυψη μιας συσκευής.
  2. Φόρτωση δεδομένων.
  3. Επικοινωνία με το περιβάλλον της.
  4. Εύκολη ολοκλήρωση συσκευών.
- Διαδικτυακή επικοινωνία.
  1. Τηλεπηρεσίες συντήρησης / ανακαθορισμού.
  2. Τηλεδιαγνωστική.
  3. Επικαιροποίηση λογισμικού.

### 8.8.2 Υλικό ελέγχου κατανεμημένων συστημάτων

Το υλικό ελέγχου ενός κατανεμημένου συστήματος μπορεί να είναι:

- Βιομηχανικοί Υπολογιστές (IPC).
- Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές (PLC).
- Μικροελεγκτές.
- Αριθμητικοί Ελεγκτές (CNC).
- Ελεγκτές Κίνησης.

Οι Βιομηχανικοί Υπολογιστές (IPC) έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ανεξαρτησία από προμηθευτές.
- Προηγμένη διεπαφή ανθρώπου μηχανής (HMI).
- Έλεγχος (Soft-PLC).
- Τμηματικότητα.
- Διαδικτυακές δυνατότητες.
- Λειτουργικά συστήματα, σύγχρονα συστήματα επεξεργασίας πραγματικού χρόνου όπως VxWorks (Wind River Systems) και Linux RTAI εκτός από Windows (NT, XP, CE) και Linux.

Οι Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές (PLC) χαρακτηρίζονται από:

- Διασύνδεση με αισθητές, ενεργοποιητές, μηχανές, ελεγκτές ταχύτητας και συστήματα οδήγησης (drive).
- Δυνατότητα διασύνδεσής τους με πακέτα HMI.
- Δικτύωση μέσω ειδικών πρωτοκόλλων. Βασίζονται συχνά σε RISC και σχεδιάζονται ώστε να ικανοποιούν απαιτήσεις βιομηχανικών περιβαλλόντων πραγματικού χρόνου.
- Εισαγωγή της γλώσσας Java και εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της για στόχους αυτοματοποίησης JavaPLC βασισμένα στο Snap ή το μικροεπεξεργαστή aJile.
- Χρήση εικονικής μηχανής Java (JVM), ώστε να είναι δυνατή η απευθείας διερμηνεία κώδικα Java και η εγγύηση απαιτήσεων πραγματικού χρόνου.

Αναφορικά για τους Μικροελεγκτές, μπορούμε να πούμε ότι υλικό ελέγχου τελευταίας γενιάς βασίζεται σε τεχνολογίες μικροεπεξεργαστών και την ιδέα των ενσωματωμένων συστημάτων, στα

οποία τα μηχανικά, ηλεκτρικά και υπολογιστικά μέρη ολοκληρώνονται σε μία μόνο συσκευή με δυνατότητες υλοποίησης μιας σειράς από λειτουργικότητες για λογικό έλεγχο, διαγνωστικά, καθορισμό κλπ.

Αναφορικά για τα CNC, ισχύουν τα παρακάτω:

- Οι αριθμητικοί ελεγκτές (NC) αποτέλεσαν τους προγόνους των σημερινών υπολογιστικών αριθμητικών ελεγκτών (CNC), με στόχο τον έλεγχο των εργαλειομηχανών και των διεργασιών εργαλείων για τις οποίες σχεδιάστηκαν.
- Μια CNC εργαλειομηχανή αποτελεί το σερβο-ενεργοποιητή της τεχνολογίας CAD / CAM (Computer Assisted Design/Computer Assisted Manufacturing).
- Από ένα αρχείο CAD δημιουργείται ένα σύνολο οδηγιών, το «πρόγραμμα» συνήθως σε ASCII κείμενο, το οποίο μεταφέρεται στη μνήμη του CNC προς εκτέλεση.

Τέλος, για τους Ελεγκτές Κίνησης ισχύουν τα εξής:

- Το τυπικό έργο των ελεγκτών κίνησης είναι η συνεχής μετακίνηση προϊόντων και εξοπλισμού από σημείο σε σημείο στο βιομηχανικό περιβάλλον.
- Οι ανάγκες επίτευξης της κίνησης με ακρίβεια, ταχύτητα και συγχρονισμό, δημιουργούν αυξημένες απαιτήσεις αξιοπιστίας.
- Το υλικό των ελεγκτών κίνησης πρέπει να ολοκληρωθεί με τα σερβο-συστήματα που ελέγχουν, τους επιταχυντές, τους σερβοκινητήρες και τις συσκευές ανατροφοδότησης.
- Αν και η βασική εστίαση των ελεγκτών κίνησης είναι σε συσκευές θέσης, πρέπει επίσης να υπάρξει έλεγχος έναυσης – παύσης και η υποστήριξη συσκευών ασφαλείας των χειριστών. Έτσι υιοθετούνται λύσεις που είναι δοκιμασμένες επιτυχώς σε PLC και αφορούν σε ολοκλήρωση εισόδων / εξόδων και υποστήριξη αρχιτεκτονικών ελέγχου. Οι λύσεις αυτές είναι κοινές ιδιαίτερος για έλεγχο πολύπλοκων ρομποτικών κινήσεων.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί και ο προγραμματισμός, τα βασικά στοιχεία του οποίου είναι:

- Προγραμματισμός βάσει ιδιοκτησιακών γλωσσών
- Ορισμένα πρότυπα σημαντικής αποδοχής είναι τα:
  1. Το πρότυπο IEC61131 γνωρίζει σημαντική αποδοχή ως κοινή γλώσσα προγραμματισμού για PLC [90].
  2. Το πρότυπο IEC61499 έχει αναδυθεί ως πρότυπο σημαντικής αποδοχής κατά τα τελευταία έτη [91].
  3. Οι γλώσσες C και Java θεωρούνται επίσης πιθανές γλώσσες προγραμματισμού πεδίου από τους προμηθευτές PLC.
- Η χρήση γλωσσών προγραμματισμού υψηλού επιπέδου στην αυτοματοποίηση επίσης αυξάνεται λόγω της αύξησης χρήσης IPC.
- Όσον αφορά σε CNC το πρότυπο ISO9001 παρέχει μια γλώσσα μεγάλης αποδοχής [92].

## 9 Βιβλιογραφία

- [1] S. Baatz, M. Frank, R. Gopffarth, D. Kassatkine, P. Martini, M. Schetelig, A. Vilavaara, : "Handoff support for mobility with IP over Bluetooth", *25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*, 2000
- [2] Beveridge, M.: "Jini on the Control Area Network (CAN): A case Study in Portability Failure", 2001.
- [3] Cach, P., Fiedler, P.: "IP over CAN" *Internet Draft, Category: Experimental*. March, 2001.
- [4] ISO 11898; "Road vehicles - Interchange of digital information - Controller area network (CAN) for high-speed communication
- [5] Santamaria, R.: "IP over IEEE-1394: Using the Internet Protocol over a high-performance serial bus", *Dedicated Systems Magazine, Networks*, 2000
- [6] Tindell, K., Burns, A., Wellings, A. : "Calculating Controller Area Network (CAN) Message Response Times", *Control Engineering Practice*
- [7] P. Bodin, S. Berge, M. Bjork, A. Edfors, J Kugelberg, and P. Rathsman. The SMART-1 attitude and orbit control system: Flight results from the first mission phase. In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, number AIAA-2004-5244, Providence, RI, 2004.
- [8] <http://www.can-cia.de>, 2004. Homepage of the organization CAN in Automation (CiA).
- [9] CAN specification version 2.0. Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany, 1991.
- [10] <http://www.esa.int/SPECIALS/SMART-1>, 2004. Homepage of the SMART-1 spacecraft of the European Space Agency.
- [11] K. Etschberger. *Controller Area Network: Basics, Protocols, Chips and Applications*. IXXAT Automation GmbH, Weingarten, Germany, 2001.
- [12] J. Froberg, K. Sandstrom, C. Norstrom, H. Hansson, J. Axelsson, and B. Villing. A comparative case study of distributed network architectures for different automotive applications. In *Handbook on Information Technology in Industrial Automation*. IEEE Press and CRC Press, 2004.
- [13] U. Kiencke, S. Dais, and M. Litschel. Automotive serial controller area network. In *SAE International Congress No. 860391*, Detroit, MI, 1986.
- [14] U. Kiencke and L. Nielsen. *Automotive Control Systems*. Springer-Verlag, Berlin, 2000.
- [15] H. Kopetz. *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1997.
- [16] G. Leen and D. Hernan. Expanding automotive electronic systems. *Computer*, 35(1):88 - 93, Jan 2002.
- [17] <http://www.osek-vdx.org>, 2004. Homepage of a joint project of the automotive industry on a standard for an open-ended architecture for distributed control units in vehicles.
- [18] M. Torngren. A perspective to the design of distributed real-time control applications based on CAN. In *2nd International CiA CAN conference*, London, U.K., 1995.
- [19] M. Torngren, K. H. Johansson, G. Andersson, P. Bodin, and D. Purdue. A survey of contemporary embedded distributed control systems in vehicles. Technical Report ISSN 1400-1179, ISRN KTH/MMK-04/xx-SE, Dept. of Machine Design, KTH, 2004.
- [20] A. T. van Zanten, R. Erhardt, K. Landesfeind, and G. Pfa. VDC systems development and perspective. In *SAE World Congress*, 1998.

- [21] <http://www.autosar.org>, 2004. Homepage of the development partnership Automotive Open System Architecture (AUTOSAR).
- [22] FlexRay Consortium: FlexRay Communications System – Electrical Physical Layer Specification, Version 2.1 Revision B.
- [23] Heller, C.; Schalk, J.; Schneele, S.; Reichel, R., "Approaching the Limits of FlexRay," Network Computing and Applications, 2008. NCA '08. Seventh IEEE International Symposium.
- [24] Réseaux Multiplexés pour Systèmes Embarqués D.PARET (Dunod).
- [25] Bonnie S. Heck, Linda M. Wills & George J. Vachtsevanos. Software Technologies for Implementing Reusable, Distributed Control Systems. IEEE Control Systems Magazine
- [26] "CAN History". CAN in Automation.
- [27] Building Adapter for Vehicle On-board Diagnostic, obddiag.net, accessed 2009-09-09
- [28] Comparison of Event-Triggered and Time-Triggered Concepts with Regard to Distributed Control Systems A. Albert, Robert Bosch GmbH Embedded World, 2004, Nürnberg
- [29] "CAN BUS MESSAGE FRAMES – Overload Frame, Interframe Space".
- [30] [http://www.iso.org/iso/catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=33422](http://www.iso.org/iso/catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=33422)
- [31] [http://www.iso.org/iso/catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=33423](http://www.iso.org/iso/catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=33423)
- [32] [http://www.iso.org/iso/catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=36055](http://www.iso.org/iso/catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=36055)
- [33] [http://www.iso.org/iso/catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=36306](http://www.iso.org/iso/catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=36306)
- [34] [http://www.iso.org/iso/catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=41284](http://www.iso.org/iso/catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=41284)
- [35] [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=59165](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=59165)
- [36] [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=33467](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=33467)
- [37] [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=54389](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=54389)
- [38] [http://standards.sae.org/j1939/11\\_200609](http://standards.sae.org/j1939/11_200609)
- [39] [http://standards.sae.org/j1939/15\\_200808](http://standards.sae.org/j1939/15_200808)
- [40] <http://www.sae.org/works/committeeHome.do?comtID=TEVSST>
- [41] [http://www.iso.org/iso/catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=33423](http://www.iso.org/iso/catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=33423)
- [42] [http://www.iso.org/iso/catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=36306](http://www.iso.org/iso/catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=36306)
- [43] <http://www.sae.org/standardsdev/groundvehicle/j1939a.htm>
- [44] [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=54389](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=54389)
- [45] <http://www.arinc-825.com>
- [46] [http://en.wikipedia.org/wiki/ARINC\\_825](http://en.wikipedia.org/wiki/ARINC_825)
- [47] <http://en.wikipedia.org/wiki/CANaerospace>
- [48] [http://en.wikipedia.org/wiki/CAN\\_Kingdom](http://en.wikipedia.org/wiki/CAN_Kingdom)
- [49] <http://en.wikipedia.org/wiki/CANopen>
- [50] <http://www.canopen.us>

- [51] <http://www.kvaser.com/en/about-can/related-protocols-and-standards/53-introduction-to-the-ccp-xcp-protocols.html>
- [52] [http://vector.com/portal/medien/supported\\_standards/xcp/Vector\\_XCP\\_Basics\\_EN.pdf](http://vector.com/portal/medien/supported_standards/xcp/Vector_XCP_Basics_EN.pdf)
- [53] <http://en.wikipedia.org/wiki/DeviceNet>
- [54] <http://www.odva.org/Home/ODVATECHNOLOGIES/DeviceNet/tabid/66/Inq/en-US/Default.aspx>
- [55] <http://www.smar.com/en/devicenet.asp>
- [56] <http://ab.rockwellautomation.com/networks-and-communications/devicenet-network>
- [57] <http://www.ab.com/en/epub/catalogs/12762/2181376/214372/1768364>
- [58] <http://en.wikipedia.org/wiki/EnergyBus>
- [59] <http://en.wikipedia.org/wiki/GMLAN>
- [60] [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=46045](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=46045)
- [61] [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=54390](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=54390)
- [62] [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_ics/catalogue\\_detail\\_ics.htm?csnumber=55283](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=55283)
- [63] <http://www.sae.org/standardsdev/groundvehicle/j1939a.htm>
- [64] <https://en.wikipedia.org/wiki/MilCAN>
- [65] <http://www.milcan.org>
- [66] <http://www.vetronics.org/research/milcan>
- [67] [http://en.wikipedia.org/wiki/NMEA\\_2000](http://en.wikipedia.org/wiki/NMEA_2000)
- [68] <http://en.wikipedia.org/wiki/RV-C>
- [69] [http://en.wikipedia.org/wiki/SafetyBUS\\_p](http://en.wikipedia.org/wiki/SafetyBUS_p)
- [70] <http://www.mercurymarine.com/gauges-and-controls/about/smartcraft-network>
- [71] <http://www.mercurymarine.com/engines/mercruiser/features/smartcraft>
- [72] <http://en.wikipedia.org/wiki/SDS>
- [73] J. Froberg, K. Sandstrom, C. Norstrom, H. Hansson, J. Axelsson, and B. Villing. A comparative case study of distributed network architectures for different automotive applications. In Handbook on Information Technology in Industrial Automation. IEEE Press and CRC Press, 2004.
- [74] [http://en.wikipedia.org/wiki/Unified\\_Modeling\\_Language](http://en.wikipedia.org/wiki/Unified_Modeling_Language)
- [75] [http://en.wikipedia.org/wiki/IBM\\_Rational\\_Unified\\_Process](http://en.wikipedia.org/wiki/IBM_Rational_Unified_Process)
- [76] [http://en.wikipedia.org/wiki/Extreme\\_programming](http://en.wikipedia.org/wiki/Extreme_programming)
- [77] [http://en.wikipedia.org/wiki/Scrum\\_\(software\\_development\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Scrum_(software_development))
- [78] [http://en.wikipedia.org/wiki/Feature-driven\\_development](http://en.wikipedia.org/wiki/Feature-driven_development)
- [79] [http://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic\\_systems\\_development\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_systems_development_method)
- [80] [http://en.wikipedia.org/wiki/Model-driven\\_architecture](http://en.wikipedia.org/wiki/Model-driven_architecture)



- [81] [http://en.wikipedia.org/wiki/Octopus\\_\(software\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Octopus_(software))
- [82] <http://www.cs.ru.nl/lab/uml/Ropes.pdf>
- [83] [http://en.wikipedia.org/wiki/IEC\\_61499](http://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61499)
- [84] <http://www.iec61499.de/>
- [85] <http://www.ida.liu.se/~TDDD25/lecture-notes/lect2-3.frm.pdf>
- [86] <http://en.wikipedia.org/wiki/PROFINET>
- [87] <http://www.agentgroup.unimore.it/wiki/images/6/6b/AOSE.pdf>
- [88] <http://www.cs.rmit.edu.au/agents/pdt/>
- [89] <http://www.auml.org/auml/documents/ID-03-07-02.pdf>
- [90] [http://en.wikipedia.org/wiki/IEC\\_61131](http://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61131)
- [91] [http://en.wikipedia.org/wiki/IEC\\_61499](http://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61499)
- [92] <http://procnc.com/>