

Μελέτη επιβατηγού αυτοκινήτου πόλης με κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος*

των Σ.Ν. Μανιά, Α. Κλαδά, Α. Καντιάνη, Γ. Καρβέλη

Εισαγωγή

Στην εποχή μας, η ρύπανση του περιβάλλοντος αναδεικνύεται με συνεχώς εντονότερο ρυθμό σε μάλιστα των μεγαλουπόλεων, προερχόμενη κατά ποσοστό μέχρι και 70% από το ιδιωτικό αυτοκίνητο και τα μέσα μαζικής μεταφοράς. Η ρύπανση της ατμόσφαιρας των μεγάλων πόλεων, αυξάνεται ανάλογα με το πλήθος των κυκλοφορούντων οχημάτων μέσα στην πόλη. Γεννιέται λοιπόν το ερώτημα, πώς θα αντιμετωπισθεί η ατμοσφαιρική ρύπανση η οφειλόμενη στην καύση μέσα στους κινητήρες των οχημάτων.

Σήμερα προτείνεται και ήδη εφαρμόζεται, η καταλυτική τεχνολογία. Η μείωση της ρύπανσης που θα επιτευχθεί, είναι εντούτοις αμφιλεγόμενη κατά την εφαρμογή της στην

πράξη και έχει να αντιμετωπίσει πολλούς επικριτές. Θεωρητικά, η επιτυγχανόμενη εξουδετέρωση των ρύπων, ανέρχεται σε 50% για τους οξειδωτικούς καταλύτες και 90% για τους τριοδικούς καταλύτες, υπό την αυστηρή προϋπόθεση τήρησης πλέον των δέκα (10) συνθηκών: λειτουργικής κατάστασης του κινητήρα, σύστασης της αμόλυβδης βενζίνης, συντήρησης του αυτοκινήτου κ.λπ. Όταν δεν τηρούνται όλοι οι όροι, τότε προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

- 1) Η διάρκεια ζωής του καταλύτη συντομεύεται.
- 2) Λόγω ευπάθειας της καταλυτι-

κής τεχνολογίας προκύπτει βλάβη, με αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη εκπομπή ρύπων και καρκινογενετικών αναθυμιάσεων.

- 3) Χάνεται ο έλεγχος της κατάστασης του καταλύτη, διότι δεν υπάρχει δυνατότητα φθηνού και σύντομου ελέγχου της καλής ή κακής λειτουργίας του.

Και ερωτάται, πόσοι θα επιβαρυνθούν την αλλαγή του καταλύτη σε περιπτώσεις πλημμελούς λειτουργίας ή καταστροφής του, όταν πρέπει να διαθέσουν πλέον των 400.000 δρχ.

Ως συμπέρασμα, προκύπτει ότι η εφαρμογή των διαφόρων τεχνολο-

* Το άρθρο αυτό αποτελεί τμήμα της συνολικής μελέτης ανάπτυξης του ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου πόλης από το εργαστήριο ηλεκτρονικών μηχανών του ΕΜΠ. Πέραν της γενικής εισαγωγής και της παραγράφου που αναφέρεται στην επιλογή των συσσωρευτών, που παρουσιάζονται αυτούσιες εδώ, η μελέτη περιλαμβάνει τέσσερις βασικές ενότητες:

- α) το αμάξωμα και το σύστημα μετάδοσης κίνησης
- β) το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης (επαγωγικός κινητήρας, αντιστροφείας ισχύος, έλεγχος κινητήρα επαγωγής)
- γ) επιλογή συστοιχίας συσσωρευτών - φορτιστές (συσσωρευτές, φορτιστής, φόρτιση βοηθητικού συσσωρευτή)
- δ) ψηφιακό σύστημα λήψης δεδομένων.

Ο Σ. Μανιάς είναι Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ, επιστ. υπεύθυνος της ερευνητικής ομάδας, ο Α. Κλαδάς είναι επιστ. συνεργάτης ΕΜΠ & οι Α. Καντιάνη και Γ. Καρβέλης είναι υποψήφιοι διδάκτορες ΕΜΠ.

ΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΜΑΞΩΜΑΤΟΣ

Ολικό μήκος	3150 mm
Ολικό πλάτος	1460 mm
Απόσταση από το έδαφος (πλήρης φορτίο)	
Απόβαρο	880 Kgr (580 + συσσωρευτές)
Μικτό βάρος	1180 Kgr
Ωφέλιμο φορτίο	250 Kgr
Θέσεις επιβατών	4
Αριθμός τροχών	4 + 1 εφεδρικός
Αριθμός κινητηρίων αξόνων	ένας (1), εμπρόσθιο
Αριθμός διευθυντηρίων αξόνων	ένας (1), εμπρόσθιο
Σύστημα υδραυλικής πέδησης:	<p>- Πέδη πορείας λειτουργούσα υδραυλικά, επενεργούσα επί των εμπροσθίων δίσκων και των οπισθίων τυμπάνων (δύο ανεξάρτητα κυκλώματα).</p> <p>- Πέδη στάθμευσης λειτουργούσα μηχανικά, επενεργούσα επί των οπισθίων τυμπάνων μέσω συρματοσχοίνου.</p>

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Τύπος κινητήρα	3 - Φ επαγωγικός κινητήρας κλωβού
Ονομαστική Ισχύς	15 KW
Ονομαστική Ροπή	50Nm
Ονομαστική πολιική τάση	220 Volts
Ονομαστική συχνότητα λειτουργίας	50 Hz
Ονομαστικό ρεύμα (γραμμής)	46 Amps
Κατασκευή κινητήρα	Εμβαιπίζόμενος κλάσης B
Συνδεσμολογία τυλιγμάτων στάτη	Τρίγωνο διπλής στρώσης
Τύλιγμα δρομέα	Κλωβού από ράβδους αλουμινίου
Κατασκευή κελύφους	Κράμα αλουμινίου
Ψύξη κινητήρα	Αερόψυκτος από ανεξάρτητη πτερωτή
cosφ	0.875
Απόδοση	90%
Θέση κινητήρα	έμπροσθεν
Στάθμη θορύβου	69 db

με τον ίδιο βαθμό προστασίας και στους δύο τύπους αυτοκινήτων, κυρίως όταν το πάγκο των αυτοκινήτων αρχίζει να γίνεται μεικτό. Πρέπει λοιπόν χωρίς συμβιβασμούς το Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο να είναι εξίσου ασφαλές με το συμβατικό αυτοκίνητο, αλλιώς δεν θα υπάρξει ποτέ. Επομένως, για την υλοποίηση ενός Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου, θα μπορούσε εύκολα να χρησιμοποιηθεί το

αμάξιμα ενός μικρού συμβατικού αυτοκινήτου (π.χ. Micra της Nissan, Marbella 850 της Seat, Cinquecento της Fiat κ.ά.).

Ηλεκτρικός κινητήρας μεγάλης απόδοσης και μικρού βάρους - όγκου - κόστους

Ένα βασικό εξάρτημα, με το οποίο χρειάζεται να συνεργασθεί

κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο το Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο, είναι ο Ηλεκτρικός Κινητήρας. Όπως παρουσιάζεται και πιο κάτω στη μελέτη, ο ιδανικότερος κινητήρας για εφαρμογή στο Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο είναι ο τριφασικός εναλλασσόμενος επαγωγικός κινητήρας κλωβού. Ο κινητήρας αυτός όταν συγκριθεί με τον αντίστοιχο σε ισχύ κινητήρα συνεχούς ρεύματος, παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- 1) Χρειάζεται σημαντικά λιγότερη συντήρηση.
- 2) Μεγαλύτερη απόδοση κατά 10%.
- 3) Μεγαλύτερη αντοχή.
- 4) Τέσσερις φορές μικρότερο κόστος.
- 5) Μικρότερο βάρος.

Το μόνο μειονέκτημα που παρουσιάζει ο εναλλασσόμενος κινητήρας έναντι του κινητήρα συνεχούς ρεύματος, είναι ότι χρειάζεται πολύπλοκο κύκλωμα ελέγχου, το οποίο σήμερα, λόγω της προηγμένης ψηφιακής τεχνολογίας, δεν αποτελεί πρόβλημα.

Σύστημα ελέγχου εναλλασσόμενου κινητήρα

Στη μελέτη αυτή, έχει επιλεγεί η τεχνική ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου του ηλεκτρονικού κινητήρα, έτσι ώστε, ο κινητήρας να ελέγχεται όπως ελέγχεται και ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος. Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται ένα σύστημα ηλεκτρικής κίνησης μεγάλης απόδοσης, αξιοποιώντας τις δυνατότητες ισχύος και ροπής του κινητήρα. Επίσης, το σύστημα αυτό παρέχει προστασία από υπερτάσεις και υπερτάσεις που μπορεί να δημιουργηθούν κατά τη λειτουργία του Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου.

Πέδηση Ηλεκτρονικού Αυτοκινήτου

Κατά την πέδηση του Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου, λόγω του ότι ο Αντιστροφείας ισχύος είναι αμφίπλευρος όσον αφορά στη ροή Ισχύος, ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας της μηχανής επαγωγής,

μεταφέρεται στην συστοιχία συσσωρευτών. Κατά την πέδηση, η μηχανική επαγωγή που λειτουργεί σαν γεννήτρια, τροφοδοτεί τον Αντιστροφέα ισχύος ο οποίος στη συνέχεια ανορθώνει την τάση της γεννήτριας, με αποτέλεσμα να φορτίζει τη συστοιχία των συσσωρευτών. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η μηχανική πέδηση. Επομένως, κατά την πέδηση του Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου, αρχικά έχουμε αναγεννητική πέδηση (Regenerative Braking) και έπειτα μηχανική πέδηση.

Ενσωματωμένος φορτιστής συσσωρευτών (312 Volts - 3 kW)

Για τη φόρτωση των συσσωρευτών έχει επιλεγεί ένας ενσωματωμένος φορτιστής ισχύος 3kW, ο οποίος χρησιμοποιεί την τεχνική υψηλών διακοπτικών συχνοτήτων (< 100 kHz), έτσι ώστε, να παρουσιάζει υψηλή πυκνότητα ισχύος, ελάχιστες απώλειες, ημιτονοειδές ρεύμα τροφοδοσίας και $\cos\phi = 1$.

Φορτιστής του βοηθητικού συσσωρευτή (12 Volts - 600W)

Για τη φόρτιση του βοηθητικού συσσωρευτή, που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των βαλκαθροιστήρων, λαμπτήρων και άλλου βοηθητικού εξοπλισμού του αυτοκινήτου, έχει επιλεγεί ένας ενσωματωμένος φορτιστής ισχύος 600W. Ο φορτιστής αυτός, ο οποίος φορτίζει το συσσωρευτή των 12 Volts από την συστοιχία συσσωρευτών των 312 Volts, έχει σχεδιαστεί, έτσι ώστε, να παρουσιάζει υψηλή πυκνότητα ισχύος και ελάχιστες απώλειες.

Στο σχήμα 1.1, παρουσιάζεται το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης του προτεινόμενου Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου. Απ' ό,τι διαπιστώνεται κι από το σχήμα 1.1, το σύστημα αυτό αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη:

- 1) Συστοιχία συσσωρευτών 312 Volts, 45 Ah.
- 2) Αντιστροφέας - ελεγκτής κινήτρου.
- 3) Εναλλασσόμενος επαγωγικός κινητήρας κλωβού.
- 4) Ενσωματωμένος φορτιστής συ-

στοιχίας συσσωρευτών των 312 Volts.

- 5) Ενσωματωμένος φορτιστής του βοηθητικού συσσωρευτή.
- 6) Μεταγωγέας (Relay). Για τη λειτουργία ή μη, του ηλεκτρικού συστήματος κίνησης.
- 7) Βοηθητικός συσσωρευτής.

Η μελέτη των παραπάνω επιμέρους στοιχείων του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης, παρουσιάζεται αναλυτικά στα επόμενα τμήματα της εργασίας αυτής. Τέλος, στο σχήμα 1.2, παρουσιάζεται η πλάγια όψη του αμαξώματος του προτεινόμενου Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου.

Επιλογή συσσωρευτών

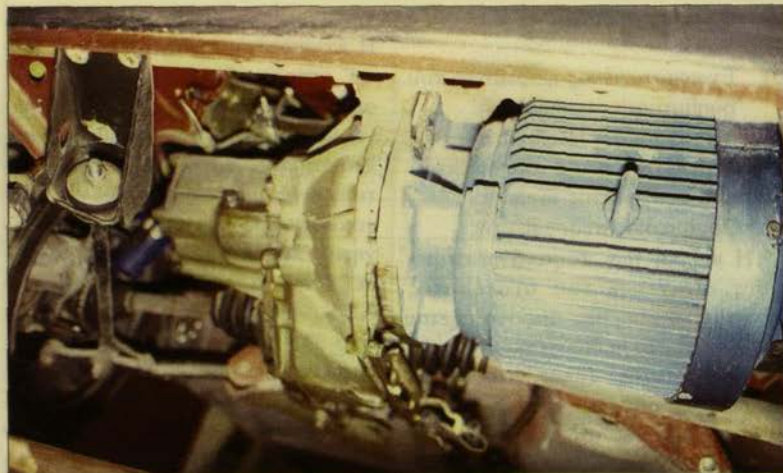
Η έλλειψη μιας εμπορικά διαθέσιμης, αποτελεσματικής και οικονομικής ηλεκτροχημικής πηγής ισχύος (συσσωρευτής), αποτελεί σήμερα τον κύριο περιοριστικό παράγοντα στην ανάπτυξη ηλεκτρικών αυτοκινήτων συμβατών με τις κυκλοφοριακές μας ανάγκες.

Το πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι η αυτονομία κίνησης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, και είναι αποτέλεσμα της κατά πολύ μεγαλύτερης πυκνότητας ενέργειας των καυσίμων με υδρογονάνθρακες, σε σύγκριση με τους διαθέσιμους ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές. Πιο απλά, ένα κιλό βενζίνης, αντιπροσωπεύει πολύ περισσότερη ενέργεια από ό,τι ένα κιλό οποιουδήποτε τύπου συσσωρευτή. Ένας τυπικός συσσωρευτής μολύβδου - οξέος, έχει σήμερα πυκνότητα ενέργειας 30 -35 Wh/kg και ένας συσσωρευτής νατρίου - θείου (από τις καλύτερα ανεπτυγμένες μονάδες) έχει 80 - 85 Wh/kg. Την ίδια στιγμή, η βενζίνη έχει πυκνότητα ενέργειας κάτι λιγότερο από 12000 Wh/kg, αν συνυπολογίσουμε και το βάρος του ρεζερβουάρ. Έτσι με μια μόνο πλήρη φόρτιση, το ηλεκτρικό αυτοκίνητο μπορεί να διανύσει πολύ μικρότερη απόσταση από ό,τι μπορεί ένα συμβατικό αυτοκίνητο με ένα γέμισμα του ρεζερβουάρ του. Επιπλέον, ο επανεφοδιασμός του αυτοκινήτου με καύσιμα, διαρκεί μόλις λίγα λεπτά, ενώ η επαναφόρτιση των

συσσωρευτών, θέλει κάποιες ώρες. Η επαναφόρτιση δε πολλών τύπων απ' αυτούς, συνοδεύεται από έκλυση αερίων (οπότε πρέπει να λαμβάνει χώρα αργά) και υπερθέρμανση. Για παράδειγμα, για την επαναφόρτιση ενός συσσωρευτή 20kWh (λογικό μέγεθος για ηλεκτρικό αυτοκίνητο), που πρέπει να ολοκληρωθεί σε 5 λεπτά από παροχή δικτύου 220V, απαιτούνται περισσότερα από 1000A, που φυσικά δεν μπορούν να ληφθούν από οποιονδήποτε ρευματολήπτη. Τέλος, οι συσσωρευτές θα πρέπει να αντικατασταθούν μία τουλάχιστον φορά κατά τη διάρκεια ζωής του αυτοκινήτου, φυσικά με κάποιο κόστος.

Ευτυχώς για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο, είναι πολύ μεγάλη η πιθανότητα, η εικόνα αυτή, να αλλάξει κάπως μέσα στα επόμενα χρόνια και δραματικά μέσα στην επόμενη δεκαετία. Δεκάδες εργαστήρια ανά τον κόσμο, ασχολούνται με την έρευνα και μέσα σ' αυτά γεννώνται οι συσσωρευτές του μέλλοντος. Ιδιαίτερα στις ΗΠΑ, η σημασία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, στην αυτοκινητοβιομηχανία της χώρας, και μέσω αυτής, στην εθνική οικονομία, οδήγησε την Κυβέρνηση να ενώσει τις δυνάμεις της με το Αμερικανικό Κοινό Κοινωνικό Προηγμένων Συσσωρευτών (USABC), που είχαν ήδη ιδρύσει οι 3 μεγάλες βιομηχανίες του χώρου, Chrysler, Ford και General Motors κάτι που αργότερα έκανε και το Ερευνητικό Ινστιτούτο Ηλεκτρικής Ισχύος (EPRI). Σκοπός αυτού του Κοινού Κοινωνικού είναι να επιβλέπει τις επιδόσεις των τεχνολογιών και ανάλογα, να τις κατατάσσει ως εξής: ώριμες (βραχυπρόθεσμες), αναπτυσσόμενες (μεσοπρόθεσμες) και πειραματικές (μακροπρόθεσμες). Στη συνέχεια, διαλέγει τις περισσότερα υποσχόμενες και αναθέτει συμβόλαια για την περαιτέρω ανάπτυξή τους.

Από τα χαρακτηριστικά των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται για κίνηση, τρία είναι τα σημαντικότερα: η πυκνότητα ενέργειας, η πυκνότητα ισχύος και οι κύκλοι λειτουργίας. Για τον ορισμό



Ο τριφασικός εναλλασσόμενος επαγωγικός κινητήρας κλωβού

αυτών των χαρακτηριστικών, χρειάζονται και οι εξής ορισμοί:

- α) ρυθμός εκφόρτισης ($\frac{C}{x}$): το ρεύμα το οποίο θα εκφόρτιζε τελείως ένας πλήρως φορτισμένος συσσωρευτής σε x ώρες. Για παράδειγμα, ένας συσσωρευτής χωρητικότητας 100 Ah έχει ρυθμό C/4 τιμής 25 A.
- β) βαθμός εκφόρτισης (DOD): το ποσοστό (επί των αμπερωρίων πλήρους φόρτισης) που έχει ήδη καταναλωθεί.

Έτσι, λοιπόν, τα τρία προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, ορίζονται ως εξής:

1) Πυκνότητα ενέργειας: η ενέργεια (σε Wh) που ο συσσωρευτής μπορεί να αποθηκεύσει ανά κιλό μάζας του, για καθορισμένο ρυθμό εκφόρτισης. Ο θεωρητικός υπολογισμός είναι απλός.

$$\text{Πυκνότητα ενέργειας} = \frac{V \cdot Ne \cdot Q}{M}$$

όπου

V είναι το δυναμικό του στοιχείου,

Ne είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που λαμβάνουν μέρος στην αντίδραση,

Q είναι το ηλεκτρονικό φορτίο (σε Ah), και

M είναι το σύνολο της μάζας (σε kg) των γραμμομορίων των αντιδρώντων μερών.

Στην πραγματικότητα, βέβαια, λόγω των κατασκευαστικών υλικών

τα οποία υπάρχουν στους συσσωρευτές, αλλά δεν λαμβάνουν μέρος στην αντίδραση παραγωγής ενέργειας (π.χ. συλλέκτες ρεύματος, ακροδέκτες, συνδέσεις κ.λπ.) και τα οποία όμως, αυξάνουν το βάρος του συσσωρευτή, η πραγματική πυκνότητα ενέργειας γίνεται πολύ μικρότερη από την ιδανική. Για παράδειγμα, στους συσσωρευτές μολύβδου - οξέος, η ιδανική τιμή είναι 171 Wh/kg και όμως η πραγματική είναι 33 Wh/kg.

2) Πυκνότητα ισχύος: ο μέγιστος αριθμός Watts ανά κιλό μάζας του συσσωρευτή, που μπορεί αυτός να αποδώσει σε καθορισμένη κατάσταση φόρτισης, συνήθως 80% βάθος εκφόρτισης.

3) Κύκλος λειτουργίας: ο αριθμός των δυνατών επαναφορτίσεων του συσσωρευτή. Ιδανικά θα έπρεπε ο συσσωρευτής να έχει ζωή, όση και το ηλεκτρικό αυτοκίνητο, αλλά ο στόχος αυτός είναι ιδιαίτερα δύσκολο να επιτευχθεί, διότι το ηλεκτρικό αυτοκίνητο παρουσιάζει μεγάλη διάρκεια ζωής. Θεωρούμε, σαν σημείο εκκίνησης, ότι το ηλεκτρικό αυτοκίνητο μπορεί να «ζήσει» για 250000 km. Θεωρώντας επίσης αυτονομία 100 km (δηλαδή τόση απόσταση μπορεί να διανύσει το όχημα με μια πλήρη φόρτιση), τότε οι συσσωρευτές πρέπει να έχουν 250 κύκλους λειτουργίας. Αν είναι να κάνει 20000 km το χρόνο το όχημα,

τότε η ζωή του συσσωρευτή είναι περίπου 6-7 χρόνια, σε περίπτωση που είναι τύπου μολύβδου - οξέος και 10-12 χρόνια, σε περίπτωση που είναι τύπου καλίου - καδμίου. Σπάνια όμως ένας συσσωρευτής θα εκφορτισθεί πλήρως μεταξύ δύο φορτίσεων. Οπότε, το ερώτημα που τίθεται είναι, αν ένας συσσωρευτής 1000 κύκλων πλήρους φόρτισης - εκφόρτισης, μπορεί να αντέξει 2000 κύκλους με 50% φόρτιση - εκφόρτιση. Η απάντηση εξαρτάται από την τεχνολογία του συσσωρευτή. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι σήμερα συσσωρευτές μολύβδου - οξέος, μπορούν. Στους συσσωρευτές νατρίου - θείου, ο κύριος παράγοντας καταστροφής τους είναι η διάβρωση, η οποία ουδενία σχέση έχει με τις φορτίσεις - εκφορτίσεις.

Εκτός όμως από τα τρία αυτά χαρακτηριστικά, υπάρχουν κι άλλα τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο. Για παράδειγμα το κόστος, το οποίο μετράει πάρα πολύ στην ευαίσθητη αγορά αυτοκινήτου. Έτσι, τα ακριβά υλικά (ασήμι και υδράργυρος), έχουν εκ των προτέρων αποκλειστεί για χρήση σε συσσωρευτές ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Ένας συσσωρευτής αργύρου - ψευδαργύρου, μπορεί να αποθηκεύσει τετραπλάσια ενέργεια από ό,τι ένας ισοδύναμος μολύβδου - οξέος, αλλά λόγω κόστους, χρησιμοποιείται μόνο στην αεροναυτική και μάλιστα, σε πολύ λίγα επιλεγμένα αεροσκάφη. Και για τα υλικά όμως που χρησιμοποιούνται, το εύρος των τιμών τους είναι πολύ μεγάλο. Το νικέλιο κοστίζει US\$7/kg, την ίδια στιγμή που το θείο έχει τιμή US\$0.1/kg. Πάντως, δεν είναι τα υλικά που κάνουν το συσσωρευτή ακριβό. Το κόστος ενός συσσωρευτή, αυξάνει κατά την κατασκευή και επεξεργασία του, που είναι διαδικασία μακρά (ως και μία εβδομάδα) και έντονη. Βεβαίως, αν η ζήτηση αυξηθεί πολύ, θα επέλθει αυτοματοποίηση σε μεγάλο μέρος της διαδικασίας, οπότε, αναμένεται και μεγάλη μείωση του κόστους.

Οι συσσωρευτές όμως που χρησιμοποιήθηκαν στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο, πρέπει να πληροούν κι άλλες

προδιαγραφές. Πρέπει να παρέχουν ασφάλεια, τουλάχιστον όση προσφέρει κι ένα ρεζερβουάρ βενζίνης σε ένα συμβατικό αυτοκίνητο, να είναι ανθεκτικοί σε ηλεκτρική ή και μηχανική καταπόνηση, να μη χρειάζονται συντήρηση, να είναι φιλικοί προς το περιβάλλον και, βέβαια, να κατασκευάζονται από τα λεγόμενα μη - στρατηγικά υλικά, τα οποία είναι δυσεύρετα στην αγορά.

Η έρευνα σήμερα γύρω από τους συσσωρευτές εστιάζεται για τις μεν μεσοπρόθεσμες τεχνολογίες στους τύπους νικελίου - σιδήρου, ψευδαργύρου - βρωμίου, νικελίου - υδρογονούχου μετάλλου και λιθίου - μονοθειούχου σιδήρου, για τις δε μακροπρόθεσμες τεχνολογίες στους τύπους λιθίου - αλουμινίου - διθειούχου σιδήρου, λιθίου - αλουμινίου - πολυμερούς, λιθίου - διθειούχου σιδήρου και λιθίου - πολυμερούς.

Κάθε τύπος, βέβαια, έχει κι αυτός τα προβλήματά του. Στους συσσωρευτές νατρίου - θείου ο στερεός ηλεκτρολύτης είναι πολύ εύθραυστος, ενώ το νάτριο και το θείο είναι υλικά επικίνδυνα. Σε επαφή του με το νερό, το νάτριο προκαλεί έκρηξη, με αποτέλεσμα την καύση του θείου και την παραγωγή δηλητηριωδών αερίων. Συνεπώς οι συσσωρευτές πρέπει να είναι ερμητικά σφραγισμένοι. Επιπλέον, έχουν θερμοκρασία λειτουργίας 300° C - 350° C. Αν η θερμοκρασία πέσει κάτω από αυτό το επίπεδο, τότε η στερεοποίηση των ηλεκτροδίων αποφεύγεται με την τοποθέτηση ενσωματωμένων κυκλωμάτων θέρμανσης. Αυτή η περιοδική ψύξη - θέρμανση προκαλεί εντάσεις στο περιβλήμα του συσσωρευτή και τον κεραμικό ηλεκτρολύτη, και μπορεί να τον καταστρέψει αν επαναλαμβάνεται συχνά. Τέτοιου τύπου συσσωρευτές έχουν αναπτυχθεί αρχικά από τη Ford στην Αμερική κι αργότερα από την ABB στην Ευρώπη. Ο συσσωρευτής της Ford χρησιμοποιείται στο αυτοκίνητο Ecostar της εταιρείας, κι έχει αναφερθεί αυτονομία μεγαλύτερη των 160 Km. Ο συσσωρευτής της ABB χρη-

ΠΙΝΑΚΑΣ I									
Χαρακτηριστικά απόδοσης συσσωρευτών για ηλεκτρικά οχήματα (για το έτος 1992 και το έτος 2000)									
		Pb-Acid	Ni-Fe	Ni-Cd	Ni-MH	Zn-Br	Na-S	Li-FeS	Li-FeS ₂
Κύκλοι (κύκλοι) λειτουργίας	1992	50-1500	300-1000	2000	500+	200-2000	800+	1000	100
	2000	200-2000	1200	3000	1000	1000	1200		
Διάρκεια (έτη) λειτουργίας	1992	20	6	20	5	1	1	1	1
	2000	20	10	25	10		10	6-10	6-10
Πυκνότητα (Wh/Kgr) ενέργειας (με ρυθμό C/5) (Wh/Lit)	1992	30*	53*	40*	60*	70	80-100**	100*	116*
	2000	50*	60*	55*	65*	80*	175**	100*	175*
	1992	85	120	70	120	56	110-130	110	245
	2000	100	130	75	120	100	265	150	400
Πυκνότητα (W/Kg) ισχύος	1992	250	100	260	100	70	250	107	600
	2000	400	110	300	150	100	400	110	600
Κόστος (US\$ ανά KWh)	1992	200	500	2000	3500	110	2000*		
	2000	150	200	1500	2500		150		

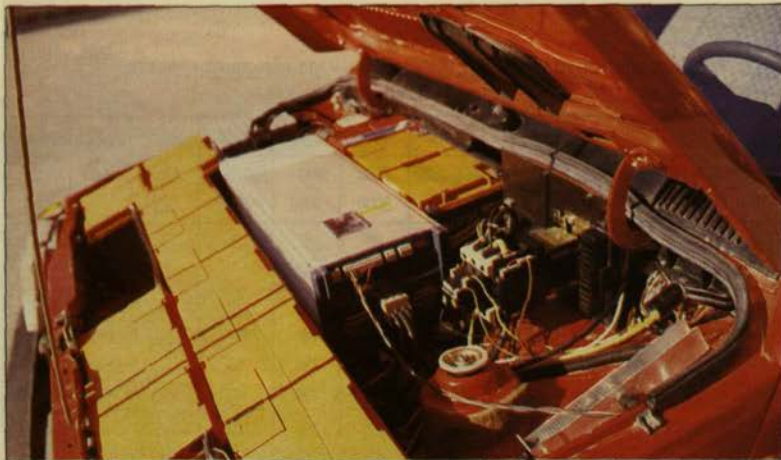
* Ανά στοιχείο ** Ανά συσσωρευτή

ΠΙΝΑΚΑΣ II						
Σύγκριση τύπων συσσωρευτών για ηλεκτρικά οχήματα						
Τύπος συσσωρευτή	Pb-Acid	Ni-Cd	NiMH	Ni Fe	Na-S	Li - Polymer
Κόστος (US\$/kWh) για αναμενόμενη ποσότητα	70	600	600	200	600	200
Πυκνότητα Ενέργειας (Wh/kg)	34	55	55	50	100	85
Πυκνότητα Ισχύος (W/Kg)	280	180	180	100	140	90
Κύκλοι Ζωής (80% DOD)	300	800	500	900	800	800
Απόδοση φόρτισης	80%	65%	65%	60%	88%	??
Διαθεσιμότητα	Άριστη	Καλή	Καθόλου	Μικρή	Μέτρια	Καθόλου
Ασφάλεια	Άριστη	Άριστη	Άριστη	??	Μέτρια	??
Περιβαλλοντική Συμπεριφορά	Μέτρια	Κακή	Καλή	Καλή	Άριστη	Καλή
Ανακυκλωσιμότητα	Άριστη	Κακή	Μέτρια	Καλή	Υποσχόμενη	Μέτρια
Διάρκεια	Καλή	Άριστη	Άριστη	Καλή	Καλή	Άριστη
Συντήρηση	Άριστη	Καλή	Άριστη	Κακή	Καλή	Άριστη

σιμοποιείται στο αυτοκίνητο BMW E1 με αυτονομία 150 km.

Οι συσσωρευτές ψευδαργύρου - βρωμίου λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά για να αποτραπεί η εκφόρτισή τους όσο δεν λειτουργούν, τους χωρίζουν σε δύο μέρη: μία ενεργό και μία εφεδρική στοιβία από πλάκες. το βρώμιο επιπλέον είναι βλαβερό και αντιδρά πολύ εύκολα.

Ο τύπος νικελίου - σιδήρου είναι πολύ ανθεκτικός σε ηλεκτρική ή και μηχανική καταπόνηση και τα υλικά που χρησιμοποιεί είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Σε σχέση όμως με την πυκνότητα ενέργειας και ισχύος που παρέχει, το κόστος του είναι πολύ μεγάλο. Εκτός αυτού, κατά τη διάρκεια της φόρτισής του παράγονται υδρογονούχα αέρια και συνεπώς αυτός ο τύπος δεν μπορεί να



Το σύστημα συσσωρευτών και ο ενσωματωμένος φορτιστής των συσσωρευτών

παραχθεί σε ερμητικά σφραγισμένη μορφή. Έχει ήδη πολλά χρόνια έρευνας κι ανάπτυξης πίσω του, και δεν αναμένεται μεγάλη πρόοδος από εδώ και πέρα. Πάντως γι' αυτόν τον τύπο, μια κατασκευάστρια ανέφερε τον Αύγουστο του 1992 πως πέτυχε 918 κύκλους βαθιάς εκφόρτισης.

Ο τύπος νικελίου - υδρογονούχου μετάλλου είναι φιλικός προς το περιβάλλον και μπορεί να δώσει ως και 81Wh/kg πυκνότητα ενέργειας. Η υψηλή αυτή τιμή οφείλεται στο ένα ηλεκτρόδιο από κράμα μετάλλου, το οποίο είναι ικανό να αποθηκεύσει υδρογόνο σε στερά μορφή.

Στους πίνακες 1 και 2 έχουν συγκεντρωθεί τα χαρακτηριστικά απόδοσης και συγκριτικά των περισσότερων από τους συσσωρευτές που ήδη αναφέρθηκαν.

Παρ' όλα αυτά όμως, μέχρι τώρα η μόνη εμπορικά διαθέσιμη και ώριμη τεχνολογία κατάλληλη για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι η τεχνολογία μολύβδου - οξέος ανεξάρτητα από τις υποσχέσεις για άλλες εξωτικές τεχνολογίες. Είναι βέβαιο πως οι συσσωρευτές μολύβδου - οξέος θα αντικατασταθούν από άλλον τύπο, αλλά ο υπολογιζόμενος χρόνος για να συμβεί αυτό, εκτείνεται στο αιώ-



τερο μέλλον, προς το τέλος αυτής της δεκαετίας κι ακόμη πιο μετά. Εξάλλου, υπάρχει πολύς ακόμη δρόμος για την ανάπτυξή τους. Σήμερα, ένας συσσωρευτής μολύβδου - οξέος μπορεί να διαρκέσει 48000 km με βαθιές εκφροστίσεις, δηλαδή περίπου 790 κύκλους ζωής. Η πυκνότητα ενέργειας και ισχύος είναι 33 Wh/kg και 93Wh/kg αντίστοιχα. Η έρευνα όμως συνεχίζεται και οι επιστήμονες του EPRI αναφέρουν συσσωρευτές μολύβδου - οξέος με πυκνότητα ενέργειας 41.5 Wh/kg και περισσότερους από 900 κύκλους ζωής. Τέλος, οι συσσωρευτές αυτού του τύπου είναι σχετικά φθινοί και άφθονοι στην αγορά, δεν παρουσιάζουν δε προβλήματα στη χρησιμοποίησή τους. Γι' αυτό και τους διαλέξαμε για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο.

Για να υπολογισθεί η χωρητικό-

τητα των συσσωρευτών, προσδιορίζεται η κατανάλωση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου για διαφόρους τύπους ημερησίων διαδρομών σε συνθήκες μεγάλης κυκλοφοριακής κίνησης. Η κατανάλωση ανά διανυόμενο χιλιόμετρο δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\text{Ah}}{\text{km}} = \frac{M(\sin\theta + \mu \cos\theta) g + 0.368 v^2}{\eta_{tr} \eta_m \cos\phi \eta_{inv} V} \cdot \frac{1000}{3600} \quad (1)$$

όπου

M: η μάζα του ηλεκτρικού αυτοκινήτου σε Kg

v: η ταχύτητα του ηλεκτρικού αυτοκινήτου σε m/sec

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/sec²)

θ: η κλίση του οδοστρώματος

μ: ο συντελεστής τριβής των ελαστικών, που ισούται με 0.015 για συμβατικά ελαστικά, ενώ για τα ειδικών προδιαγραφών Good Year GT Electric παίρνει την τιμή 0.0085

η_{tr}: ο βαθμός απόδοσης του συστήματος μετάδοσης

η_m: ο συντελεστής απόδοσης του κινητήρα

η_{inv}: ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα - ελεγκτή

V: η τάση της συστοιχίας των συσσωρευτών

Απώλειες όμως (δηλαδή κατανάλωση ενέργειας) εμφανίζονται και κατά τις στάσεις, μειούμενες κατά

την ηλεκτρική πέδηση. Οι απώλειες αυτές αναφέρονται στον πίνακα III ως $W_{b,loss}$, ενώ στον ίδιο πίνακα αναφέρονται και η κινητική ενέργεια του οχήματος W_k , το μέρος της που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια κατά την πέδηση W_{reg} , η καταναλούμενη από τον συσσωρευτή ενέργεια $W_{b,cons}$ και η αποθηκευόμενη σ' αυτόν $W_{b,loss}$.

Στις ανηφορικές διαδρομές υπάρχει επίσης κατανάλωση ενέργειας, η οποία, αφού υπολογισθεί η ανάκτηση ενέργειας λόγω ηλεκτρικής πέδησης, ισοδυναμεί με απώλεια για ανύψωση κατά $\Delta h = 20$ m ίση με $W_{b,loss} = 0.192$ Ah.

Ο υπολογισμός της κατανάλωσης έχει λοιπόν ως εξής: από τον τύπο (1) υπολογίζεται η κατανάλωση ανά km σαν να επρόκειτο για κίνηση σε δρόμο χωρίς κλίση ($\sin\theta = 0, \cos\theta = 1$) και πολλαπλασιάζεται επί τον αριθμό των διανυμένων χιλιομέτρων. Στη συνέχεια, προστίθενται οι απώλειες ανά στάση επί τον αριθμό των στάσεων και τέλος, για να υπολογίσουμε τις απώλειες για την κυκλοφορία σε ανηφορικές διαδρομές, θεωρούμε κάποιον αριθμό «ανηψώσεων» κατά 20m. Φυσικά έχει ληφθεί υπ' όψη η τάση με την οποία πρέπει να τροφοδοτεί η συστοιχία των συσσωρευτών, ο αντιστροφέας - ελεγκτής και κατ' επέκταση ο κινητήρας. Για παράδειγμα, στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο επελέγη τριφασικός επαγωγικός κινητήρας πολιικής τάσης 220 Volts, ώστε να αποφευχθούν υψηλά ρεύματα στα τυλίγματα του στάτη και τα ημιαγωγικά στοιχεία του αντιστροφέα. Καθώς το κέρδος τάσης του ελεγχόμενου με την τεχνική PWM αντιστροφέα είναι $V_{out}/V_{in} = 0,7$ για να επιτευχθεί πολιική τάση εξόδου 220 Volts rms χρειάζεται συνεχής τάση εισόδου 312 Volts. Αυτό επιτυγχάνεται με 26 στοιχεία των 12 Volts.

Στον πίνακα IV δείχνονται κάποιες πρότυπες διαδρομές, και ο συνδυασμός αυτών δίνει τις τυπικές διαδρομές που είναι συχνότερες στην πόλη των Αθηνών και τα περίχωρα. Αυτές οι τυπικές διαδρομές έχουν ως εξής:

ΤΔ-Α: 8km - 40 Km/h - 40 στάσεις & 22km - 75 km/h - 10 στάσεις & $\Delta h = 2 \times 20$ m κατανάλωση 18.23 Ah (πρότυπες διαδρομές 1, 2, 3, 5, 11).

ΤΔ-Β: 8 km - 40 km/h - 40 στάσεις & 50km - 75 km/h - 20 στάσεις & $\Delta h = 6 \times 20$ m κατανάλωση 34.45 Ah (πρότυπες διαδρομές 1, 2, 4, 6, 13).

Οικον: 8 km - 40 km/h - 40 στάσεις & 22 km - 60 km/h 10 στάσεις & $\Delta h = 2 \times 20$ m κατανάλωση 15.62 Ah (πρότυπες διαδρομές 1, 2, οικον., 11).

ΤΔ-Γ: 55 km - 90 km/h - 10 στάσεις & $\Delta h = 4 \times 20$ m

κατανάλωση 35.52 Ah (πρότυπες διαδρομές 7, 8, 12)
ΤΔ-Δ: 50 km - 100 km/h - 6 στάσεις κατανάλωση 34.82 Ah (πρότυπες διαδρομές 9, 10)

Η απαιτούμενη χωρητικότητα των συσσωρευτών επιλέγεται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ημερήσια αυτονομία του οχήματος. Από τους προηγούμενους υπολογισμούς είναι φανερό πως συσσωρευτές χωρητικότητας 40 Ah ικανοποιούν τις απαιτήσεις μας, αφού σε καμιά περίπτωση η κατανάλωση δεν ξεπέρασε αυτήν την τιμή. Για τις τυπικές διαδρομές Β, Γ, Δ, χρειάζεται μια φόρτιση ανά διαδρομή, ενώ στην περίπτωση της τυπικής διαδρομής Α και της πιο οικονομικής, αρκεί μια φόρτιση ανά δύο διαδρομές. Τα

ΠΙΝΑΚΑΣ III

Απώλεια ενέργειας ανά στάση

v (km/h)	15	40	75	90	100
W_k (J)	11,860	75,040	257,400	368,200	437,100
$W_{b,cons}$ (J)	19,192	121,430	416,520	595,860	707,320
W_{reg} (J)		63,180	245,540	356,340	425,240
$W_{b,stor}$ (J)		43,970	170,900	248,020	295,970
$W_{b,loss}$ (J)		77,460	245,620	347,800	411,450
$W_{b,loss}$ (J)		0.069	0.219	0.310	0.366

ΠΙΝΑΚΑΣ IV

Πρότυπες διαδρομές περιοχής Αθηνών και περιχώρων

Πρότυπη Διαδρομή	Ταχύτητα (Km/h)	Αριθμός Km ή στάσεων	Κατανάλωση ανά km (Ah)	Κατανάλωση συνολική (Ah)
1	40	8 km	0.310	2.48
2	40	40 στάσεις	0.069	2.76
3	75	22 km	0.474	10.42
4	75	50 km	>>	23.69
5	75	10 στάσεις	0.219	2.19
6	75	20 στάσεις	>>	4.37
7	90	55 km	0.575	31.63
8	90	10 στάσεις	0.310	3.10
9	100	50 km	0.652	32.62
10	100	6 στάσεις	0.366	2.20
οικον.	60	22 km	0.392	8.62
>>	60	10 στάσεις	0.138	1.38
11	Ανύψωση κατά Δh 2x20 m		0.192	0.38
12	Ανύψωση κατά 4x20 m		>>	0.77
13	Ανύψωση κατά 6x20 m		>>	1.15

