

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

2021-2022

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΑΕΡΟΣΑΚΟΥ

| Επώνυμο | Όνομα | Αριθμός Μητρώου | Έτος |
|------------|-----------|-----------------|----------------|
| Γιαννάκης | Μύρων | 1072899 | 3 ^ο |
| Θεοφίλου | Στυλιανός | 1072791 | 3 ^ο |
| Μπούμπαλης | Γεώργιος | 1072695 | 3 ^ο |

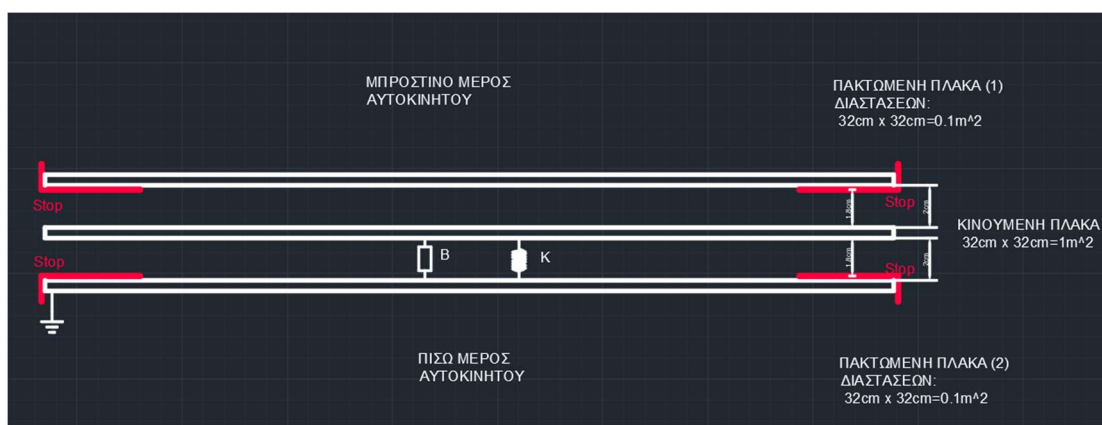
Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας ήταν ο σχεδιασμός ενός χωρητικού αισθητήρα επιτάχυνσης για χρήση σε σύστημα αερόσακου αυτοκινήτου. Το σύστημα αποτελείται μία γέφυρα Wheatstone με τέσσερις πυκνωτές, κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης, ένα χαμηλοπερατό RC φίλτρο και τέλος το Read-Out κύκλωμα. Σχεδιάστηκε εξ' ολοκλήρου στο περιβάλλον Matlab Simulink (έκδοση R2022A) με χρήση στοιχείων της βιβλιοθήκης Simscape Electrical – Specialized Power Systems και των βασικών βιβλιοθηκών του Simulink για επεξεργασία σημάτων. Ο αερόσακος ενεργοποιείται σε περίπτωση (στιγμιαίας) επιβράδυνσης μεγαλύτερης των 50G.

Τα συνοδευτικά αρχεία έχουν υποβληθεί στο exams eclass και από τους τρεις μας.

1.1 Περιγραφή Πυκνωτή Μεταβλητής Χωρητικότητας

Βασικό στοιχείο του επιταχυνσιόμετρου αποτελεί ένας μεταβλητός πυκνωτής τριών παράλληλων πλακών. Οι δύο εξωτερικές πλάκες είναι σταθερές και η ενδιάμεση είναι ελεύθερη να κινηθεί. Ο πυκνωτής είναι προσανατολισμένος όπως φαίνεται στην *Εικόνα 1*. Η ενδιάμεση πλάκα κινείται προς τα εμπρός εάν το αυτοκίνητο επιβραδυνθεί και προς τα πίσω εάν επιταχυνθεί.



Εικόνα 1, αρχείο «Capacitive_Sensor_Design.dwg»

Τα μεγέθη του πυκνωτή επιλέχθηκαν μέσω δοκιμών στο Matlab μετά την κατασκευή του μαθηματικού μοντέλου.

1.2 Μαθηματικό Μοντέλο Πυκνωτή Μεταβλητής Χωρητικότητας

Έστω $y(t)$ η χρονική μετατόπιση της κινούμενης πλάκας και $u(t)$ η μετατόπιση του συστήματος (δηλαδή των σταθερών πλακών και αυτοκινήτου).

Έστω M η μάζα της κινούμενης πλάκας, k η σταθερά του ελατηρίου και B η σταθερά του αποσβεστήρα.

Ορίζουμε ως $z(t) = y(t) - u(t)$ τη σχετική μετατόπιση της πλάκας, δηλαδή τη μετατόπισή της από το άκρο της σταθερής πλάκας που βρίσκεται στο πίσω μέρος.

Οι δυνάμεις που ασκούνται στην κινούμενη πλάκα είναι οι εξής:

- Δύναμη Ελατηρίου: $F_{ελ}(t) = -k \times z(t)$
- Δύναμη αποσβεστήρα: $F_{απ}(t) = -B \times z'(t)$

Από το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα έχουμε $\Sigma F = M \times y''(t)$ με $y''(t)$ την επιτάχυνση της κινούμενης πλάκας. Αφού $z(t) = y(t) - u(t) \Leftrightarrow y''(t) = z''(t) + u''(t)$.

Άρα:

$$-[k \times z(t)] - [B \times z'(t)] = M \times [z''(t) + u''(t)] \Leftrightarrow$$

$$[M \times z''(t)] + [B \times z'(t)] + [k \times z(t)] = [M \times u''(t)] \Leftrightarrow (M/\Sigma \text{ LAPLACE})$$

$$[s^2 \times Z(s)] + [s \times (B/M) \times Z(s)] + [k/M \times Z(s)] = -[s^2 \times U(s)] \Leftrightarrow$$

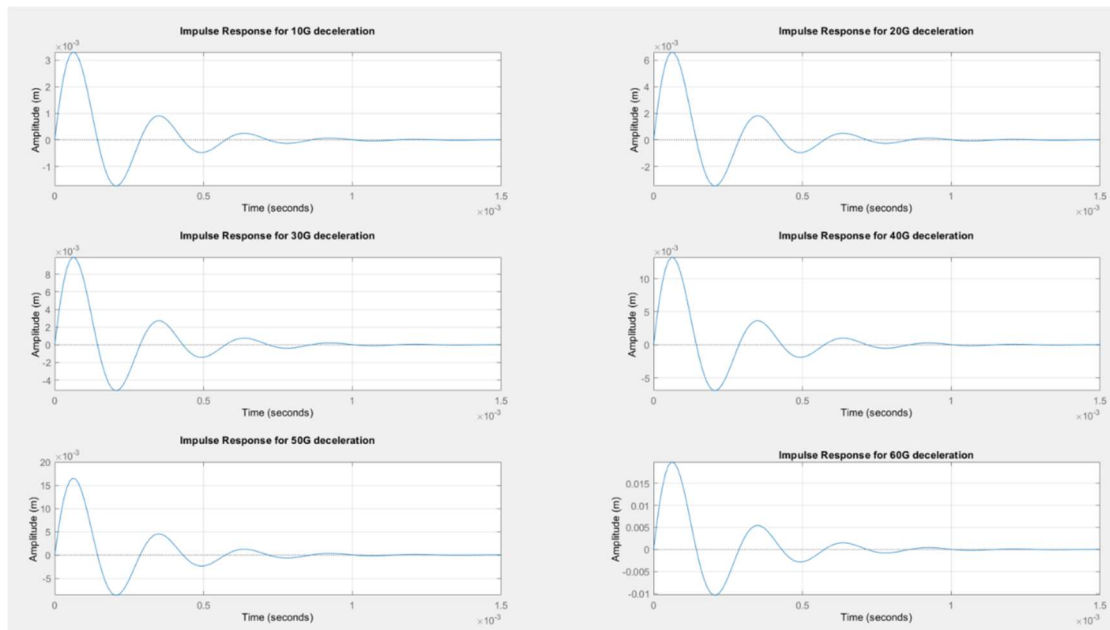
$$\frac{Z(s)}{s^2 U(s)} = \frac{-1}{s^2 + s \frac{B}{M} + \frac{k}{M}} \rightarrow \text{Συνάρτηση Μεταφοράς Συστήματος}$$

(Σχέση μεταξύ επιτάχυνσης αυτοκινήτου και σχετικής μετατόπισης πλάκας)

Η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης δεν υπολογίστηκε αναλυτικά αλλά προσομοιώθηκε μέσω της συνάρτησης μεταφοράς στο περιβάλλον Matlab για διάφορες τιμές της επιτάχυνσης. Όταν το αυτοκίνητο επιβραδύνεται (αρνητική επιτάχυνση), τότε η πλάκα μετακινείται αρχικά προς τα εμπρός (θετικό z), στη συνέχεια ταλαντώνεται για ένα μικρό χρονικό διάστημα και έπειτα ισορροπεί στη θέση ισορροπίας. Αντίθετα, όταν το αυτοκίνητο επιταχύνεται (θετική επιτάχυνση), η πλάκα μετακινείται αρχικά προς τα πίσω και έπειτα ακολουθείται η ίδια διαδικασία.

Έπειτα από δοκιμές στο Matlab με διάφορα μεγέθη για τις παραμέτρους M , k και B , επιλέχθηκαν ως $M = 10^{-4} \text{ kg}$, $k = 5 \times 10^4 \text{ N/m}$ και $B = 0.9 \text{ Ns/m}$.

Η ταλάντωση της πλάκας για διαφορετικές τιμές επιβράδυνσης του οχήματος φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 2

Η οριακή τιμή στην οποία ενεργοποιείται το σύστημα του αερόσακου είναι για πλάτος ταλάντωσης 1.65cm (50G επιτάχυνσης) από το σημείο ισορροπίας της πλάκας. Το μέγιστο επιτρεπτό πλάτος ταλάντωσης είναι τα 1.8cm, στο σημείο αυτό τοποθετείται ακμή (Εικόνα 1) η οποία σταματάει την κίνηση της πλάκας, ώστε να μην ακουμπήσει με τη σταθερή.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, επιλέχθηκε ως αρχική απόσταση (d) μεταξύ κινούμενης και σταθερής πλάκας τα 2cm.

Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή παράλληλων πλακών δίνεται από τον τύπο: $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$.

Όταν το αυτοκίνητο επιβραδύνεται, τότε:

- Η χωρητικότητα μεταξύ της πλάκας (1) και την κινούμενης πλάκας ισούται με

$$C_1(t) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d - z(t)}$$

- Η χωρητικότητα μεταξύ της πλάκας (2) και την κινούμενης πλάκας ισούται με

$$C_2(t) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d + z(t)}$$

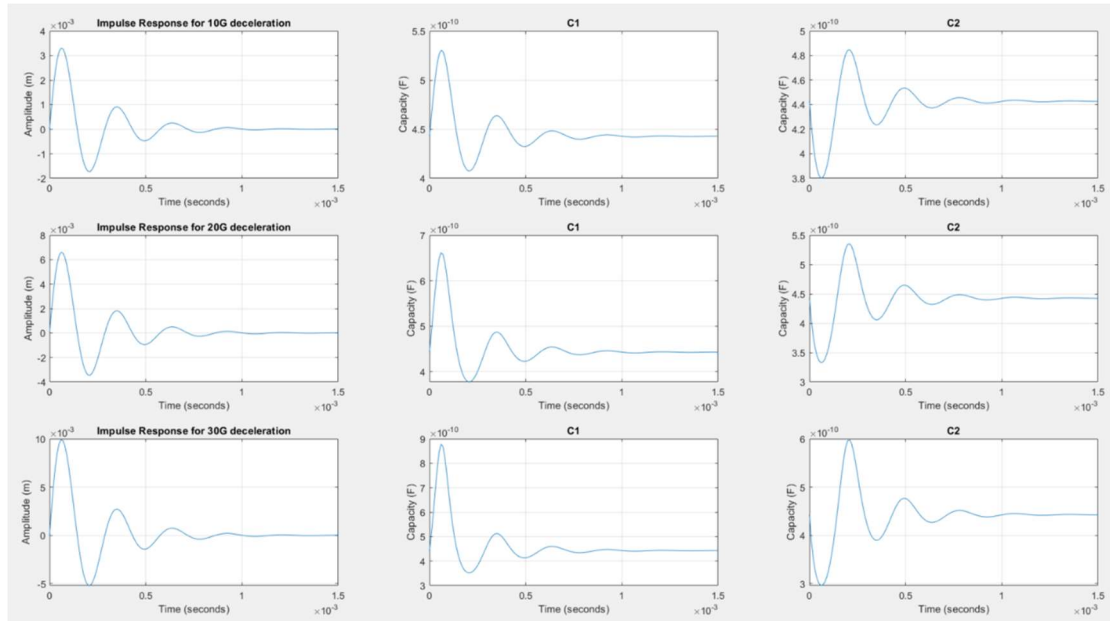
Όπου A το εμβαδόν των πλακών και d η αρχική απόσταση μεταξύ πλάκας (1) και κινούμενης πλάκας (ή πλάκας (2) και κινούμενης πλάκας).

Έτσι, όταν το αυτοκίνητο επιβραδύνεται, η C_1 αυξάνεται και η C_2 μειώνεται. Αντίθετα συμβαίνει όταν το αυτοκίνητο επιταχύνεται.

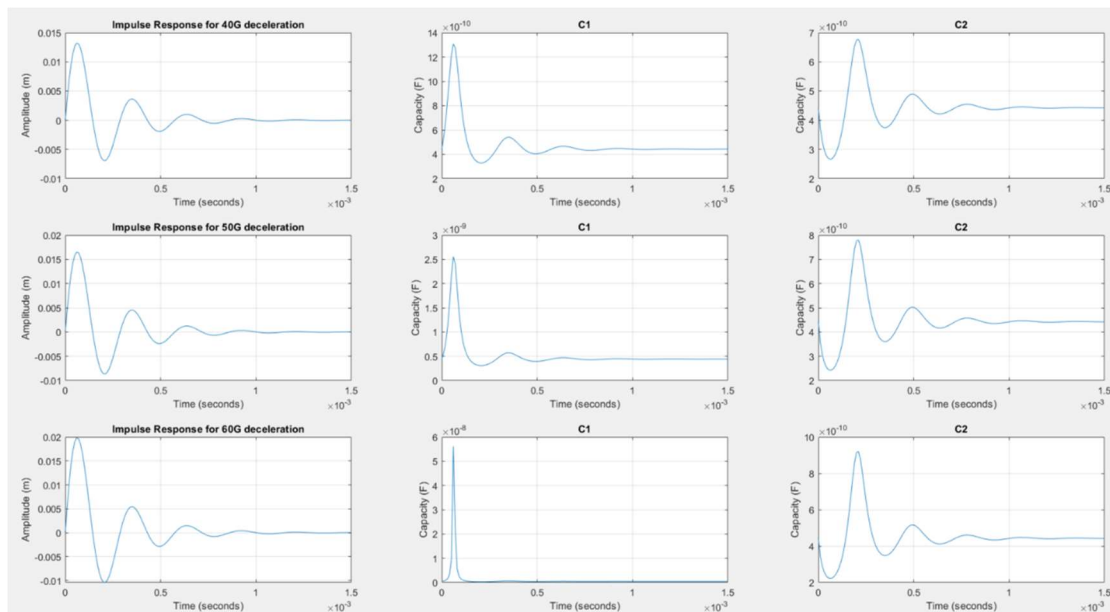
Έπειτα από δοκιμές στο Matlab με διάφορα μεγέθη για τα χαρακτηριστικά των πυκνωτών, επιλέχθηκαν ως $\epsilon_r = 10$ (σταθερά του διηλεκτρικού μέσου) και $A = 0.1\text{m}^2$ (εμβαδόν πλακών).

Έτσι, η αρχική χωρητικότητα των μεταβλητών πυκνωτών είναι ίση με $4.43 \times 10^{-10} \text{F}$.

Οι αλλαγές στη χωρητικότητα των πυκνωτών για διάφορες τιμές της επιτάχυνσης φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Εικόνα 3



Εικόνα 4

2.1 Περιγραφή και Ανάλυση Βασικού Κυκλώματος Επιταχυνσιόμετρου

Ο πυκνωτής με την κινούμενη πλάκα μοντελοποιείται στο Simulink ως δύο ξεχωριστοί μεταβλητοί πυκνωτές. Ο πυκνωτής C_1 τροφοδοτείται με τις τιμές της χωρητικότητας C_1 και ο C_2 από τις τιμές της χωρητικότητας C_2 , όπως αυτές υπολογίζονται από το Matlab στην παράγραφο 1.2.

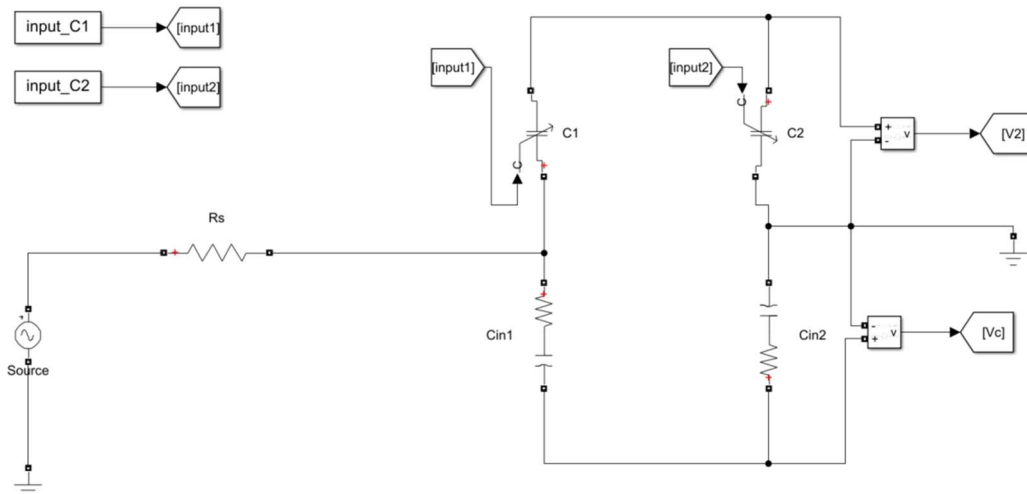
Οι πυκνωτές C_{in1} και C_{in2} είναι ίσης χωρητικότητας και χρησιμοποιούνται για την γραμμικοποίηση του κυκλώματος, σχηματίζοντας μία γέφυρα Whitestone. Οι αντιστάσεις εν σειρά με

τους παραπάνω πυκνωτές ουσιαστικά μοντελοποιούν την αντίσταση των καλωδίων και είναι πολύ μικρές ($1\text{m}\Omega$).

Επιπλέον, οι πυκνωτές C_{in} επιλέχθηκαν να είναι χωρητικότητας $4.43 \times 10^{-10}\text{F}$, όση είναι και η χωρητικότητα των μεταβλητών πυκνωτών σε κατάσταση ισορροπίας (μηδενική επιτάχυνση).

Η πηγή έχει πλάτος 12V (τυπική τάση μιας μπαταρίας αυτοκινήτου) και συχνότητα 10kHz . Η αντίσταση $R_s = 0.1\Omega$ είναι η εσωτερική αντίσταση της πηγής.

Για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης χρησιμοποιείται η τάση V_2 μεταξύ της κινούμενης πλάκας και της σταθερής πλάκας (2) και η τάση V_c στα άκρα του πυκνωτή C_{in2} .



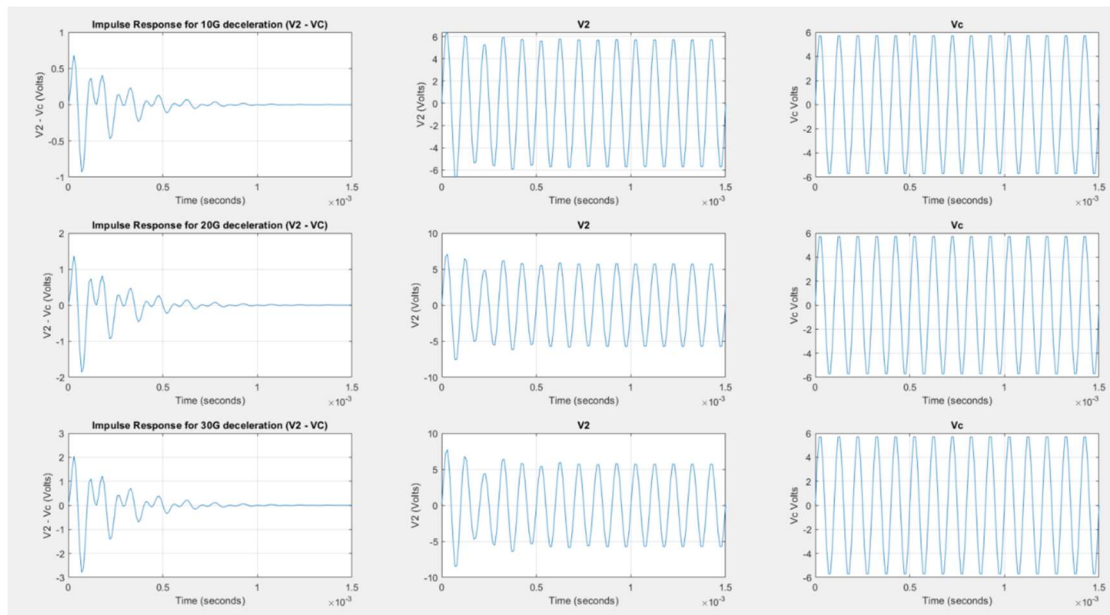
Εικόνα 5

Αναλύοντας το κύκλωμα στο πεδίο της συχνότητας (Χρήση Μ/Σ Laplace) και θεωρώντας αμελητέες τις εν σειρά αντιστάσεις καταλήγουμε στο εξής συμπέρασμα για τις τάσεις εξόδου:

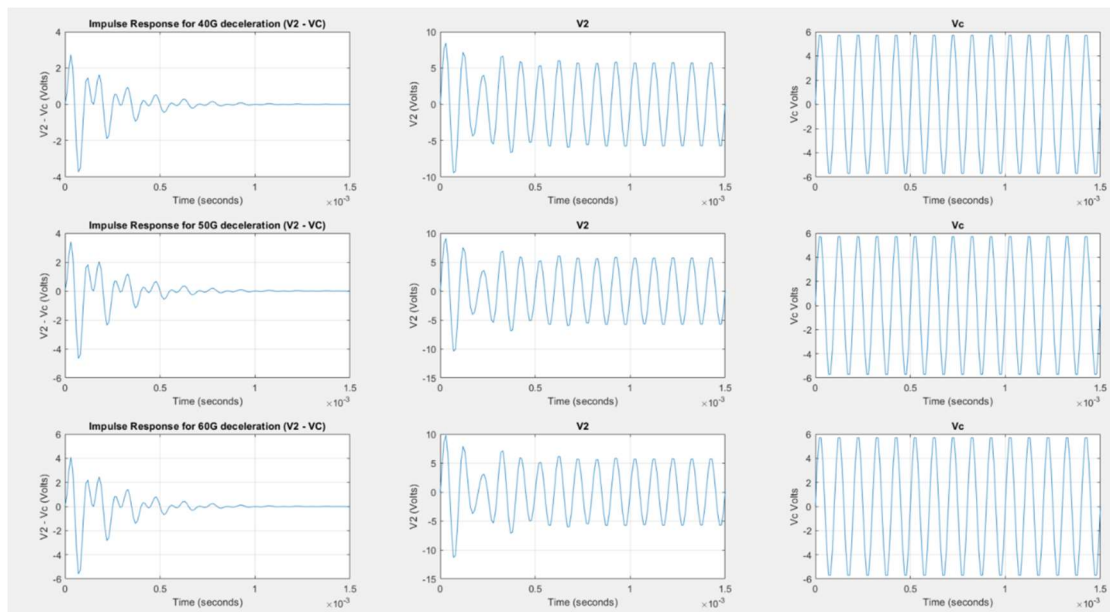
$$V_c \approx V_{\text{source}} / 2 \text{ και } V_2 \approx V_{\text{source}} \times C_2 / [C_1 + C_2].$$

Για να μετρήσουμε την επιτάχυνση του συστήματος, εξετάζουμε τη διαφορά των τάσεων εξόδου $V_2 - V_c$.

Στο επόμενο διάγραμμα φαίνονται οι τάσεις εξόδου για διαφορετικές τιμές της επιτάχυνσης.

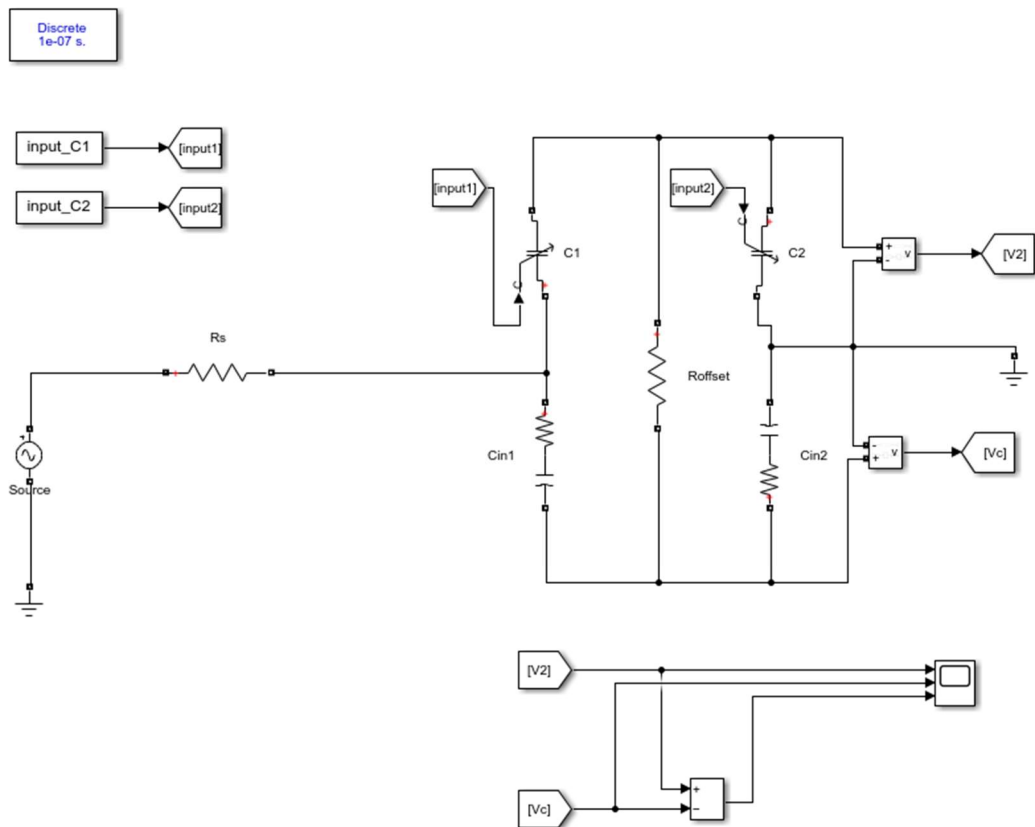


Εικόνα 6



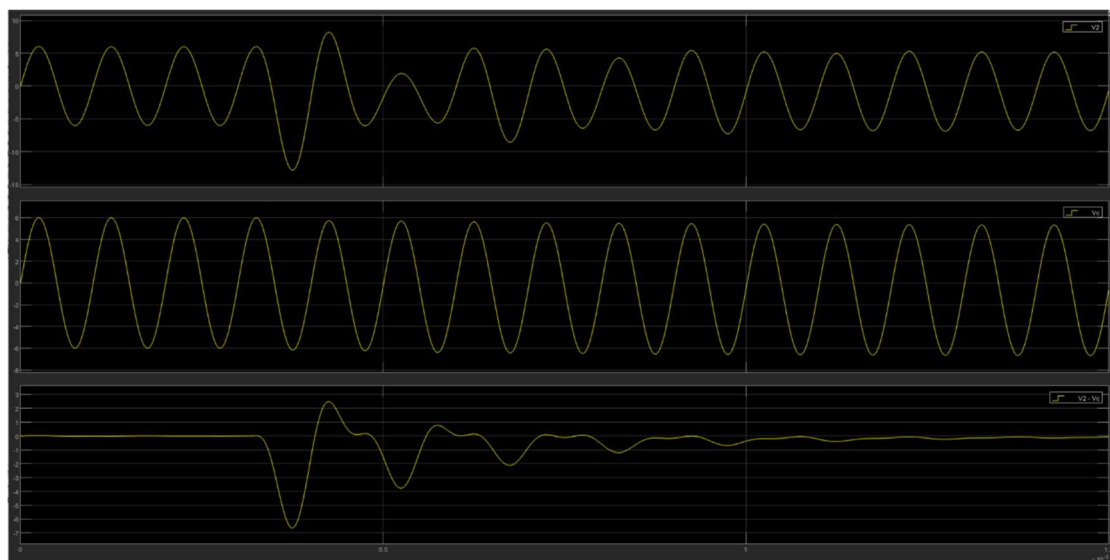
Εικόνα 7

Προσομοιώνοντας το παραπάνω κύκλωμα με το Simulink, ανιχνεύθηκε μία μετατόπιση στην τάση V_2 στη μόνιμη κατάσταση, η οποία μετατόπιζε προς τα αρνητικά και τη $V_2 - V_c$. Η μετατόπιση αυτή έθετε σε ταλάντωση το κύκλωμα και ήταν ανεπιθύμητη. Για να εξαλειφθεί η μετατόπιση, προστέθηκε μία αντίσταση R_{offset} μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας των δύο τάσεων (παράλληλα με την έξοδο του συστήματος).



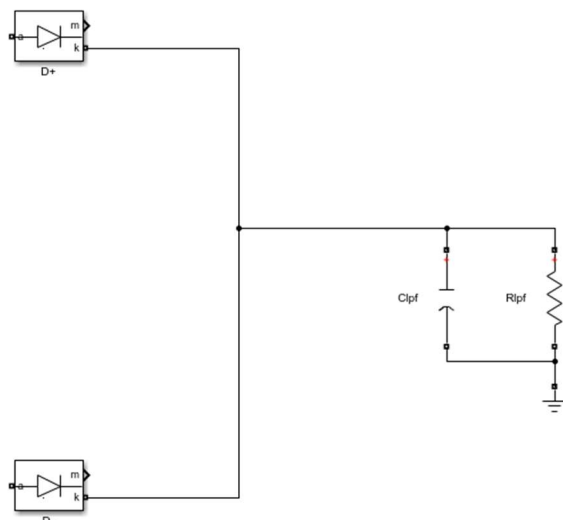
Εικόνα 8

Οι μετρούμενες τάσεις μαζί με την τάση $V_2 - V_c$ για την κρίσιμη επιτάχυνση των 50G, εφόσον το κύκλωμα δουλεύει σε σταθερή κατάσταση για 0.32ms φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 9

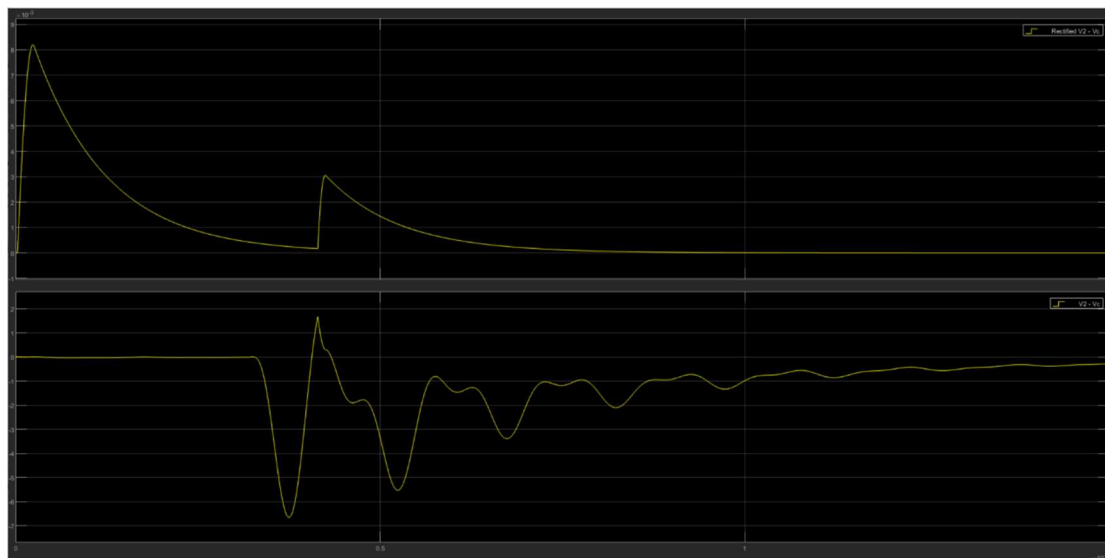
2.2 Περιγραφή Κυκλώματος Ανόρθωσης και Φιλτραρίσματος



Εικόνα 10

Χρησιμοποιήθηκαν δύο δίοδοι τάσης $V_{\text{forward}} = 0.7\text{V}$ και αντίστασης $R_{\text{on}} = 1\text{m}\Omega$ για την ανόρθωση του σήματος $V_2 - V_c$. Ο πυκνωτής του φίλτρου έχει χωρητικότητα $1\mu\text{F}$ και η αντίσταση είναι 100Ω .

Το σήμα στην έξοδο του RC φίλτρου για την κρίσιμη επιτάχυνση των 50G συγκρινόμενο με το μη ανορθωμένο σήμα $V_2 - V_c$ φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 11

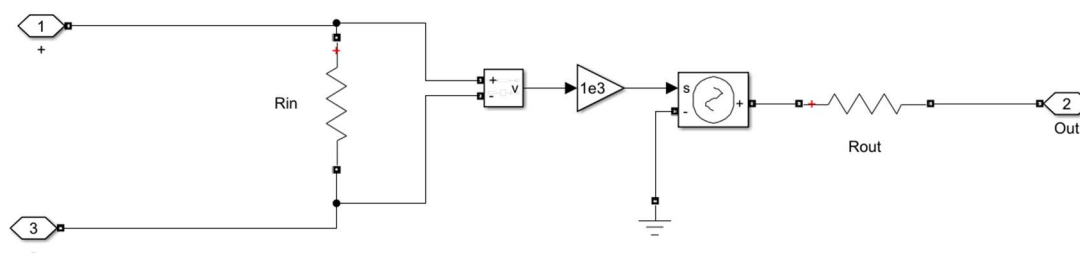
Το μεταβατικό φαινόμενο (αρχική φόρτιση και εκφόρτιση του C_{lpf}) στην αρχή λειτουργίας του κυκλώματος εξαλείφεται με τον πολλαπλασιασμό του σήματος εξόδου με ένα σήμα ενεργοποίησης, το οποίο έχει μηδενικό πλάτος όσο διαρκεί το μεταβατικό φαινόμενο (βηματική συνάρτηση). Επιλέχθηκαν τα 0.3ms ως χρόνος ενεργοποίησης.

Η τάση ενεργοποίησης της εξόδου (άνοιγμα αεροσάκου) επιλέχθηκε να είναι 2.8V , εφόσον η peak τιμή για τα 50G επιτάχυνσης είναι 3V .

Η τάση εξόδου ακολουθεί σχηματικά την τάση εξόδου που υπολογίστηκε θεωρητικά μέσω της Matlab, έχοντας πτώση τάσης και μετατόπιση εξαιτίας των παραπάνω παθητικών και μη γραμμικών στοιχείων και του φίλτρου που χρησιμοποιήθηκαν στο κύκλωμα εξομοίωσης.

2.3 Περιγραφή Ιδανικού Διαφορικού Ενισχυτή

Το σήμα εξόδου της παραγράφου 2.2 είχε πλάτος της τάξης των mV ($10^{-3}V$), επομένως χρειαζόταν να ενισχυθεί. Η βιβλιοθήκη Specialized Power Systems δεν είχε υλοποιημένο διαφορικό ενισχυτή, οπότε σχεδιάστηκε ένας ώστε να ενισχυθεί το σήμα.

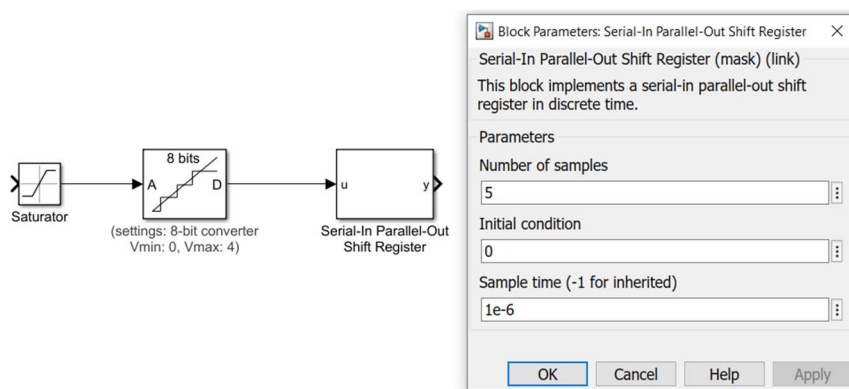


Εικόνα 12

Η αντίσταση εισόδου R_{in} είναι της τάξης των GΩ, άπειρη συγκριτικά με τις παραμέτρους του κυκλώματος. Η αντίσταση εξόδου R_{out} είναι της τάξης των mΩ, σχεδόν μηδενική. Η πηγή τάσης είναι DC και ελέγχεται από την τάση στα άκρα της R_{out} . Η τάση εισόδου του ενισχυτή ενισχύεται 100 φορές και περνάει στην έξοδο.

Το σήμα εξόδου του ενισχυτή πολλαπλασιάζεται με μία βηματική συνάρτηση (Enable Signal) με μηδενική τιμή πριν τα 0.3ms, ώστε να εξαλειφθεί το μεταβατικό φαινόμενο.

2.4 Κύκλωμα Κβάντισης και Ψηφιοποίησης Σήματος



Εικόνα 13

Αρχικά το σήμα οδηγείται σε έναν saturator ώστε να περιορισθεί μεταξύ των 0 και 4V. Ο αερόσακος ανοίγει για τάση εξόδου μεγαλύτερη από 2.8V, οπότε δε χρειάζεται η τάση εξόδου να ξεπερνά τα 4V.

Ο ADC μετατροπέας είναι των 8 bits και έχει $V_{min} = 0V$ και $V_{max} = 4V$.

Η συχνότητα δειγματοληψίας του κυκλώματος ορίζεται ως 1MHz, δηλαδή λαμβάνεται 1 δείγμα ανά 1μs. Οι τιμές που παράγει ο ADC μετατροπέας οδηγούνται προς έναν καταχωρητή ολίσθησης σειριακής εισόδου – παράλληλης εξόδου με 5 θέσεις.

2.5 Κώδικας Λήψης Απόφασης

```
1 function outs = fcn(u)
2
3 threshold = 180;
4
5 y = 0;
6 if (u(1)+u(2)+u(3)+u(4)+u(5))/5 > threshold
7 y = 1;
8 end
9
10 outs = y;
```

Εικόνα 14

Οι 5 παράλληλοι έξοδοι του καταχωρητή αποτελούν είσοδο της παραπάνω συνάρτησης.

Εάν ο μέσος όρος των 5 τελευταίων τιμών που δειγματοληπτήθηκαν είναι μεγαλύτερος των 2.8V, η συνάρτηση επιστρέφει 1 (ενεργοποιείται ο αερόσακος).

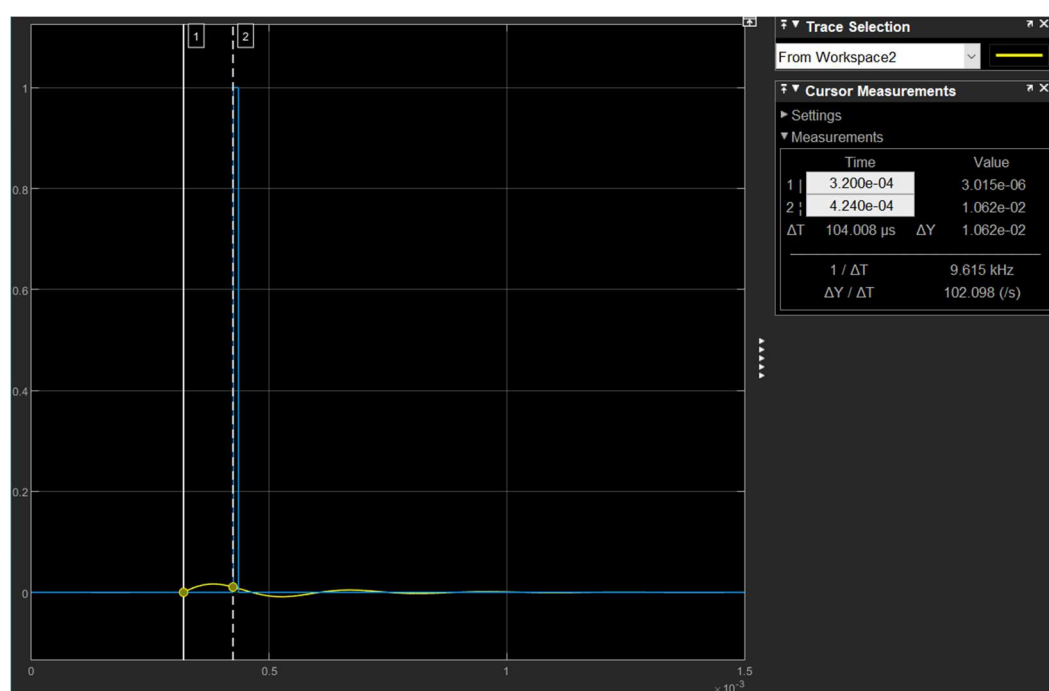
Εάν η συνάρτηση επιστρέψει 1, ενεργοποιείται ένα λαμπάκι, το οποίο αντιστοιχεί στη λήψη της απόφασης για άνοιγμα του αεροσάκου. Η διάρκεια για την οποία παραμένει αναμμένο για μερικά ms, οπότε δεν είναι διακριτό στην προσομοίωση. Για το λόγο αυτό, η έξοδος της συνάρτησης αποθηκεύεται στο αρχείο outputs.mat.

3.1 Απόκριση του συστήματος

Η κρουστική είσοδος (επιτάχυνση) συμβαίνει τη χρονική στιγμή 0.32ms (Δείκτης 1 στο διάγραμμα).

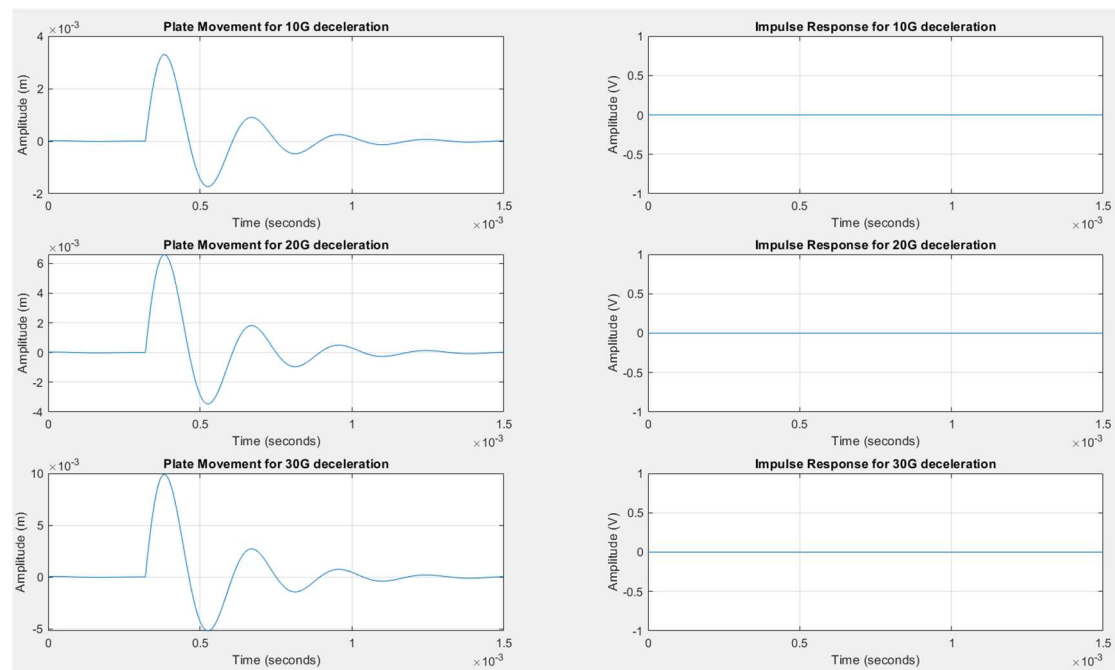
Το σύστημα δίνει θετική έξοδο τη χρονική στιγμή 0.424ms (Δείκτης 2 στο διάγραμμα).

Συνεπώς το σύστημα χρειάζεται 0.104ms ή 104μs (ΔT στο διάγραμμα) για να αποκριθεί στην κρίσιμη επιτάχυνση των 50G.

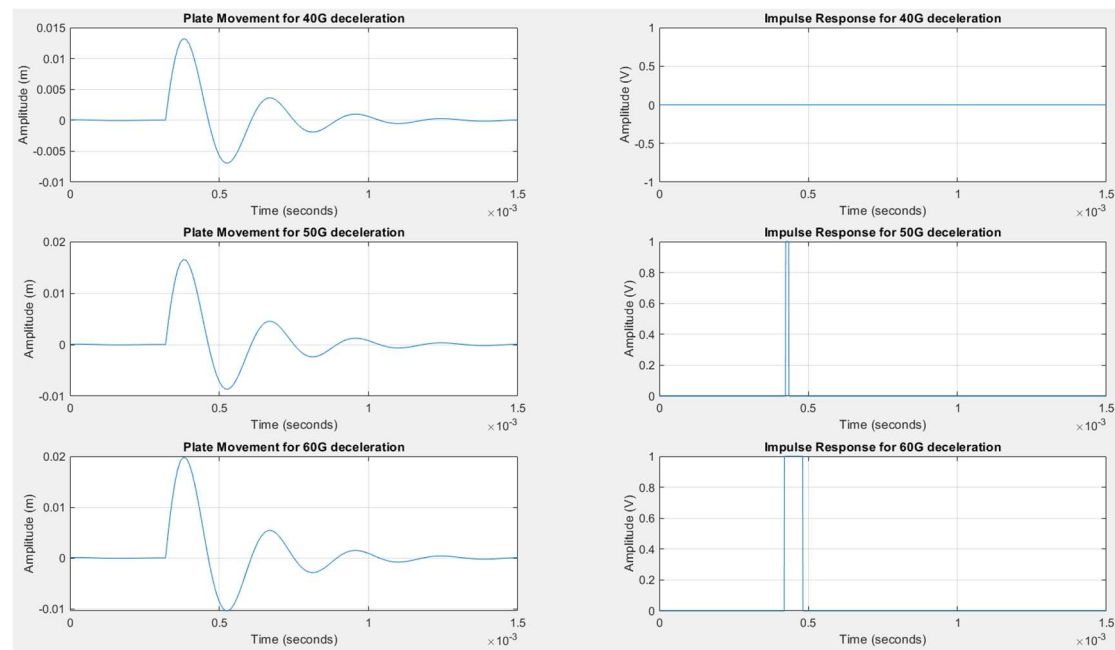


Εικόνα 15

3.2 Αποκρίσεις για διαφορετικές τιμές στιγμιαίας (κρουστικής) επιτάχυνσης

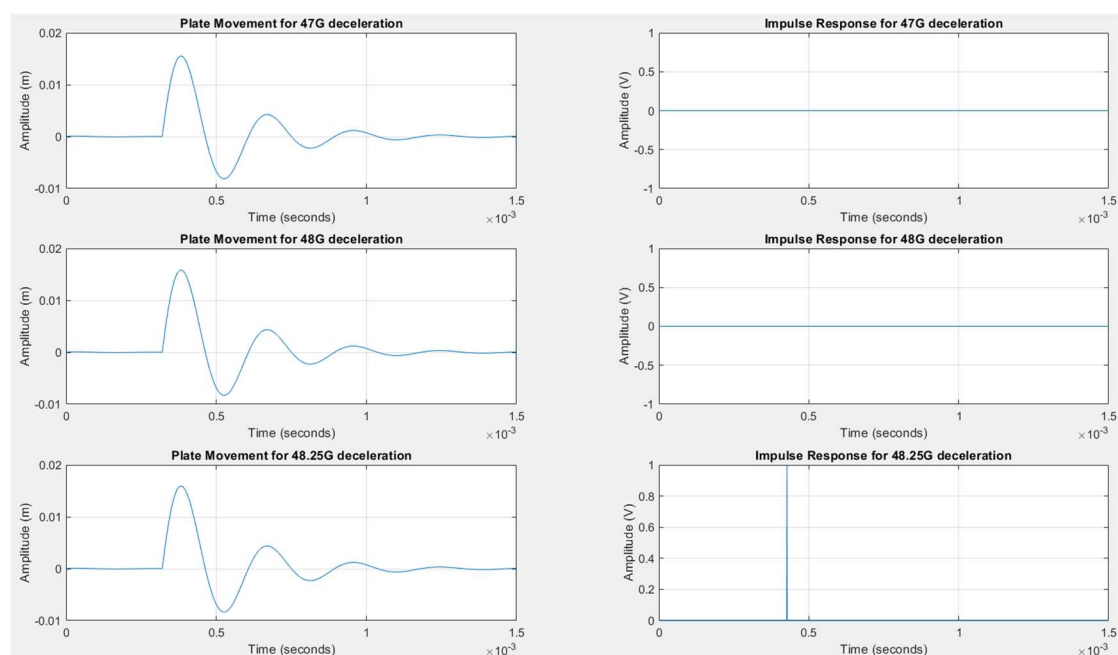


Εικόνα 16

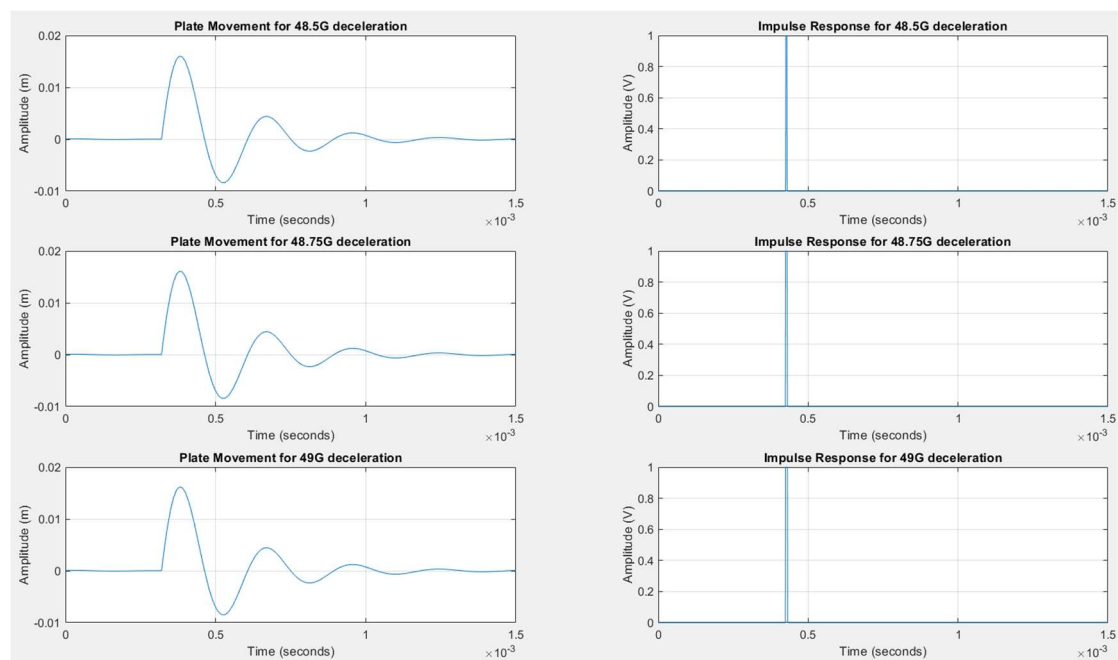


Εικόνα 17

3.3 Αποκρίσεις για τιμές κοντά στην κρίσιμη τιμή επιτάχυνσης



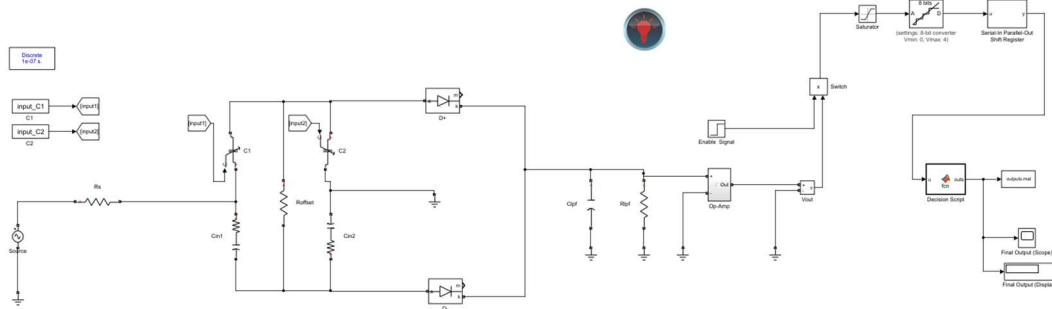
Εικόνα 18



Εικόνα 19

Το σύστημα ενεργοποιεί τον αερόσακο για τιμή επιτάχυνσης λίγο μικρότερη των 50G. Το περιθώριο αυτό είναι επιθυμητό, καθώς, σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, δύναται η αναλογική τάση εξόδου -που απαιτείται για την ενεργοποίηση του αεροσάκου- να προσεγγίσει τα 2.8V χωρίς να τα ξεπεράσει, παρότι η επιτάχυνση είναι 50G. Το περιθώριο αυτό επιτρέπει στο σύστημα να ενεργοποιείται με επιτάχυνση $50G \pm 3.5\%$ και μπορεί να ρυθμιστεί επιλέγοντας κατάλληλη τιμή threshold στον κώδικα απόφασης (2.5).

4.1 Ολοκληρωμένο Σύστημα



Εικόνα 20, αρχείο «circuit.slx»

Τα αρχεία Simulink δημιουργήθηκαν στην έκδοση R2022a του Matlab – Simulink.

Σε όλες τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος επίλυσης (solver) «ode23tb» με μέγιστο βήμα 10^{-5} s. Ο χρόνος τερματισμού είναι τα 0.0015 seconds.

Χρησιμοποιήθηκε επιπλέον το Discrete Power GUI με sample time 10^{-7} s.

Το κύκλωμα βρίσκεται στο αρχείο «circuit.slx».

Στο αρχείο «measurements.slx» βρίσκεται το κύκλωμα μαζί με scopes και displays ώστε να ελέγχεται η ορθή λειτουργία του.

Πριν προσομοιωθεί το κύκλωμα πρέπει να εκτελεστεί το αρχείο «create_inputs.m» με την επιθυμητή τιμή της επιτάχυνσης.

Αναλυτικές οδηγίες για τη διαδικασία της προσομοίωσης βρίσκονται στο αρχείο «README.txt».