



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΡΟΗ Σ: ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ
ΕΛΕΓΧΟΥ
ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: ΨΥΛΛΑΚΗΣ Χ. ΚΟΡΔΩΝΗΣ Ι.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΣΤΟ ΧΩΡΟ **ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**

Ονοματεπώνυμο: Λάππας Νικόλαος 03121098

1. Εισαγωγή

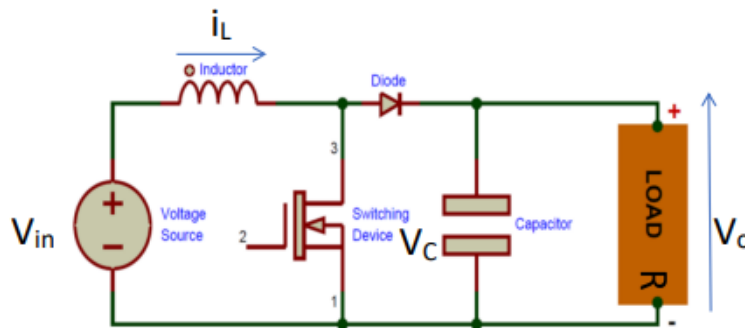
Στην παρούσα εργαστηριακή άσκηση μελετήσαμε ένα κύκλωμα ισχύος και συγκεκριμένα έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα συνεχούς τάσης (DC-DC, boost converter). Το κύκλωμα αυτό, όπως φαίνεται παρακάτω, αποτελείται από:

Έναν ελεγχόμενο διακόπτη MOSFET, ο οποίος έχει δυο καταστάσεις λειτουργίας (ON-OFF), καταστάσεις αγωγής ρεύματος (περιοχή κόρου) και περιοχή αποκοπής

Ένα πηνίο υπεύθυνο για την συλλογή του ρεύματος και την εναπόθεση αυτού στο κύκλωμα όταν το MOSFET είναι OFF

Μια δίοδο, η οποία εμποδίζει την ροή του ρεύματος προς την πηγή εισόδου (μεριά καθόδου) ενώ επιτρέπει την ροή ρεύματος (ενέργειας) προς το φορτίο όταν MOSFET OFF

Έναν πυκνωτή, η τάση του οποίου σταθεροποιεί την τάση εξόδου του κυκλώματος



Η αρχή λειτουργίας του κυκλώματος στηρίζεται στις εναλλαγές των καταστάσεων του διακόπτη MOSFET. Αυτές η εναλλαγές γίνονται με μεγάλη συχνότητα $f_s = \frac{1}{T_s}$, και συγκεκριμένα, αν εισάγουμε τον όρο D , γνωστό ως duty cycle, με $0 < D < 1$, τότε ο διακόπτης άγει για χρόνο $D \cdot T_s$ και δεν άγει για χρόνο $(1 - D) \cdot T_s$.

2. Μοντελοποίηση Συστήματος

Το σύστημά μας μπορεί να μοντελοποιηθεί κατάλληλα εξετάζοντας ξεχωριστά τις δυο καταστάσεις. Συγκεκριμένα, οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα είναι:

Για MOSFET ON

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} V_{in}$$
$$\frac{dV_C}{dt} = -\frac{1}{CR} V_C$$

Για MOSFET OFF

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_{in} - V_C)$$
$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_L - \frac{V_C}{R} \right)$$

Μέσο μοντέλο: Επειδή η συχνότητα λειτουργίας, f_s , είναι αρκετά μεγάλη, μπορούμε να περιγράψουμε το σύστημά μας από ένα σύνολο δυο διαφορικών εξισώσεων που περιλαμβάνει και τις δυο καταστάσεις.

$$\begin{aligned}\frac{di_L}{dt} &= \frac{1}{L}V_{in} - (1-D)\frac{1}{L}V_C \\ \frac{dV_C}{dt} &= \frac{1}{C}(1-D)i_L - \frac{V_C}{RC}\end{aligned}$$

Για το παραπάνω σύστημα των μη-γραμμικών διαφορικών εξισώσεων:

Μεταβλητές κατάστασης είναι το ρεύμα του πηνίου i_L και η τάση στα άκρα του πυκνωτή V_C , η οποία ισούται με την τάση εξόδου V_O .

Μεταβλητή εισόδου είναι το D

Διαταραχές αποτελούν οι μεταβλητές R και V_{in} με την έννοια ότι δεν τις ελέγχουμε και πιθανώς να έχουν κάποια απόκλιση από την επιθυμητή τιμή

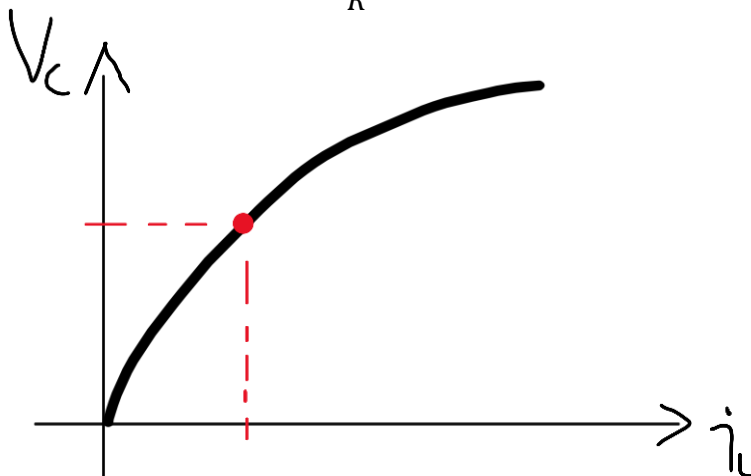
Άρα, λοιπόν, ελέγχοντας το duty cycle καθορίζουμε - εν μέρη - την επιθυμητή τάση εξόδου.

Στην συνέχεια επιθυμούμε να βρούμε τα σημεία ισορροπίας του συστήματος για τις διάφορες τιμές του D . Ακολουθεί η μεθοδολογία επίλυσης:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = 0 \\ \frac{dV_C}{dt} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{in} = (1-D)V_O \\ V_O = (1-D)i_L R \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{V_O}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \\ \frac{V_O}{R} = (1-D)i_L \end{cases}$$

Επομένως, τα σημεία ισορροπίας πρέπει να ικανοποιούν την ακόλουθη σχέση, η οποία αποτελεί την αρχή διατήρηση της ενέργειας (αριστερά η ενέργεια εισόδου, δεξιά η ενέργεια του φορτίου R).

$$V_{in}i_L = \frac{V_O^2}{R}, 0 < D < 1$$



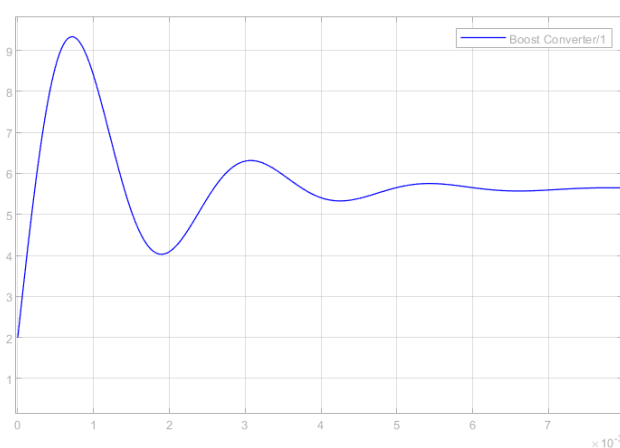
Άρα όπως βλέπουμε στην παραπάνω γραφική παράσταση, τα πιθανά σημεία ισορροπίας ανήκουν πάνω σε μια καμπύλη. Στόχος μας είναι να γραμμικοποιήσουμε το σύστημα γύρω από κάποιο σημείο ισορροπίας και να ελέγξουμε τι συμβαίνει στην περιοχή εκείνη.

3. Έλεγχος Ανοιχτού Βρόχου

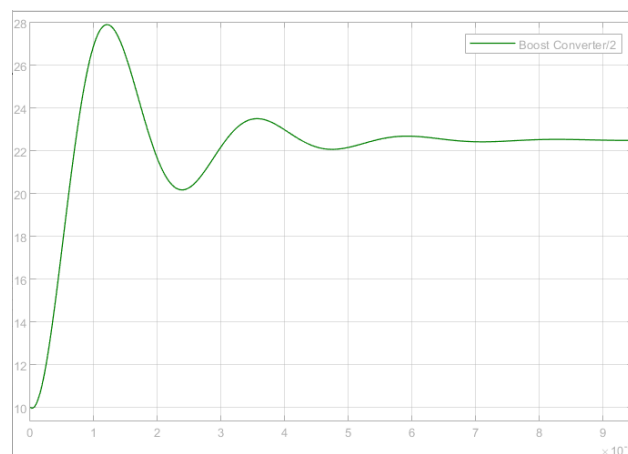
Θεωρούμε τις τιμές $V_{in} = 9V$, $L = 300\mu H$, $C = 70\mu F$, $R = 10\Omega$, και επιθυμητή τάση εξόδου $V_o = V_c = 22.5V$.

Προσμοιώνουμε, αρχικά, το σύστημα με την βοήθεια του αρχείου *'Boost_Simplified_Model.slx'* στο Simulink και του εισάγουμε τις σταθερές που μας δίνονται και $D = 0.6$. Τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι:

Για το ρεύμα πηνίου:



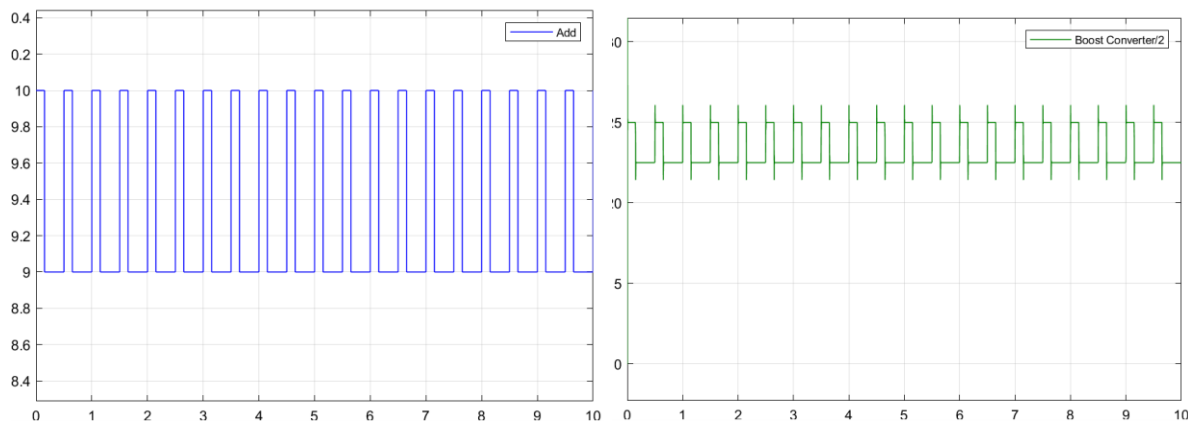
Για την τάση εξόδου:



Φαίνεται ότι μετά το μεταβατικό στάδιο το σύστημα έχει τελική τάση εξόδου 22.5V.

Στην συνέχεια εξετάσαμε την περίπτωση οι παράμετροι V_{in} και R να μην έχουν σταθερές τιμές αλλά μια μεταβαλλόμενη τιμή χάρη σε impulse generator στο Simulink.

Για τάση εισόδου της ακόλουθης μορφής, έχουμε την εξής τάση εξόδου:



Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι η τάση εξόδου πλέον εναλλάσσει τις τιμές της από 22.5V έως 31.4V περίπου. Κρίσιμο είναι το μεταβατικό φαινόμενο που παρατηρείται όταν αλλάζει το επίπεδο στάθμης, ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο ταλαντώσεων. Για να απορρίψουμε ασυμπτωτικά αυτές τις αλλοιώσεις, θα σχεδιάσουμε κατάλληλο ελεγκτή προκειμένου να πηγαίνουμε απευθείας στην επιθυμητή τιμή.

4. Γραμμικοποίηση του Συστήματος

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, για να γραμμικοποιήσουμε το σύστημα, αρκεί να βρούμε ένα σημείο ισορροπίας, V_c^{ss}, i_L^{ss} , και να εξετάσουμε τι γίνεται σε μια περιοχή γύρω από αυτό. Θέλουμε να φέρουμε το σύστημα στη μορφή $\dot{x} = Ax + Bu + d$, $x = [x_1, x_2]^T = [i_L, V_c]^T$.

Θεωρούμε, ορχικά ότι :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = i_L - i_L^{ss} \\ x_2 = V_c - V_c^{ss} \\ u = D - D^{ss} \\ d = V_{in} - V_{in}^N \end{array} \right\} \quad \text{όπου } d : \text{ διαταραχή.}$$

όρα $\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = \dot{i}_L \\ \dot{x}_2 = \dot{V}_c \\ D = u + D^{ss} \\ V_{in} = d + V_{in}^N \end{array} \right\}$

Αντικαθιστούμε στο εξίσωση $\left\{ \begin{array}{l} V_1 = (1-D) \cdot V_0 \\ V_0 = (1-D) \cdot i_L \cdot R \end{array} \right\}$

και παίρνουμε:

$$\dot{X}_1 = \frac{1}{L} \left[V_1^{ss} + d - (1-D^{ss}-u)(V_c^{ss} + X_2) \right] = \frac{1}{L} \left[V_1^{ss} + d - ((1-D^{ss})V_c^{ss} - uV_c^{ss} + (1-D^{ss})X_2 - X_2 \cdot u) \right] = \frac{1}{L} \left[d + uV_c^{ss} - (1-D^{ss})X_2 + X_2 u \right] =$$

$$\boxed{\dot{X}_1 = -\frac{1-D^{ss}}{L} X_2 + \frac{V_c^{ss}}{L} u + \frac{1}{L} d}$$

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{C} \left[(1-D^{ss}-u)(i_L^{ss} + X_1) - \frac{1}{R}(V_c^{ss} + X_2) \right] = \frac{1}{C} \left[(1-D^{ss})i_L^{ss} + (1-D^{ss})X_1 - i_L^{ss}u - X_1 \cdot u - \frac{1}{R}V_c^{ss} - \frac{1}{R}X_2 \right] =$$

$$= \frac{1}{C} \left[(1-D^{ss})X_1 - i_L^{ss}u - X_2 \cdot u - \frac{1}{R}X_2 \right] \Rightarrow$$

$$\boxed{\dot{X}_2 = \frac{1-D^{ss}}{C} X_1 - \frac{1}{RC} X_2 - \frac{i_L^{ss}}{C} u}$$

Τελικά παίρνουμε τον πίνακα του συστήματος $\dot{X} = Ax + Bu + \bar{d}$

όπου:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-D^{ss}}{L} \\ \frac{1-D^{ss}}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{V_0^{ss}}{L} \\ -\frac{i_L^{ss}}{C} \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \bar{d} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Έχουμε θεωρήσει σταθερή διαταραχή στην τάση εισόδου. Αν θέλαμε να 'γενικεύσουμε' θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε διαταραχή της μορφής $d = R - R^{ss}$ και να εξάγουμε τις νέες εξισώσεις κατάστασης. Ωστόσο αυτό θα περιέπλεκε το πρόβλημά μας και επιλέξαμε να μην ασχοληθούμε.

Τελικά προέκυψε ένα γραμμικό μοντέλο για τον σχεδιασμό ενός ελεγκτή, τον οποίο στην συνέχεια θα εφαρμόσουμε πάνω στο μη-γραμμικό μοντέλο.

Με την βοήθεια του Matlab, υπολογίζουμε την συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος θεωρώντας $y = x_2$, οπότε $C = [0 \ 1]$. Οι υπολογισμοί αυτοί βρίσκονται στο αρχείο με όνομα 'transfer_func_ex4.m'.

```
>> transfer_func_ex4

sys =

      -8.036e04 s + 4.286e08
      -----
      s^2 + 1429 s + 7.619e06

Continuous-time transfer function.

The system is NOT minimum phase.
```

Όπως τυπώνουμε και στο Matlab το σύστημα δεν είναι ελάχιστης φάσης διότι η συνάρτηση μεταφοράς που έχουμε έχει μηδενικό στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο.

5. Έλεγχος Κλειστού Βρόχου

Στο συγκεκριμένο θέμα καλούμαστε να σχεδιάσουμε έναν ολοκληρωτικό (PI) ελεγκτή για το γραμμικοποιημένο σύστημα με τοποθέτηση πόλων. Θα θεωρήσουμε αρχικά το επαυξημένο διάνυσμα κατάστασης: $x_{ag} = \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}$ όπου $\dot{z} = y - y_{ref} = Cx - y_{ref}$. Επομένως, οι νέοι επαυξημένοι πίνακες θα είναι: $A_{ag} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}$ και $B_{ag} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$.

Θα θεωρήσουμε, επίσης, είσοδο της μορφής $u = K_p x + K_I \int_0^t (y(\tau) - y_{ref}) d\tau = K_p x + K_I z$, και θα εξετάσουμε αν το σύστημα μας είναι ελέγξιμο. Αν το ζεύγος (A_{ag}, B_{ag}) είναι ελέγξιμο, τότε μπορούμε να τοποθετήσουμε τις ιδιοτιμές του $(A_{ag} - B_{ag}K)$ αυθαίρετα όπου μας βολεύει προκειμένου να απορρίψουμε τις διαταραχές και να γίνει $y \rightarrow y_{ref}$.

Στο αρχείο 'transfer_func_ex4.m' υπάρχει ο κώδικας για την τοποθέτηση των ιδιοτιμών στις θέσεις $[-1500, -1800, -200]$. Θα μπορούσαμε να τοποθετήσουμε τις ιδιοτιμές οπουδήποτε αλλού προκειμένου να εκπληρώσουμε τις επιθυμητές προδιαγραφές του εκάστοτε προβλήματος.

Παρακάτω θα δείξουμε τις ιδιοτιμές του πίνακα A_{ag} και του πίνακα $(A_{ag} - B_{ag}K)$ αφού προσδιορίσουμε την θέση των επιθυμητών ιδιοτιμών και πάρουμε το διάνυσμα των κερδών K .

$$K = [0.0112 \quad -0.0153 \quad 1.2600]$$

```
>> eig(Aag)
ans =
    1.0e+03 *
    0.0000 + 0.0000i
   -0.7143 + 2.6662i
   -0.7143 - 2.6662i

>> eig(Aag-Bag*K)
ans =
    1.0e+03 *
   -1.8000
   -1.5000
   -0.2000
```

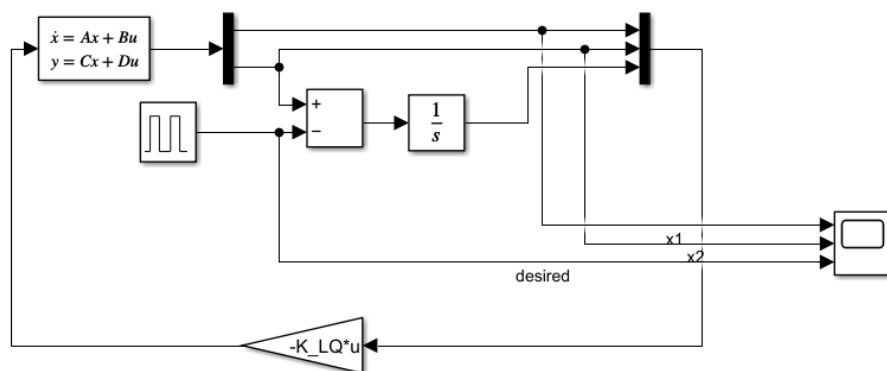
Τέλος, θα προχωρήσουμε σε μια ακόμα τεχνική τοποθέτησης ιδιοτιμών, αυτή του γραμμικού τετραγωνικού ελέγχου. Στο αρχείο 'transfer_func_ex4.m' υπάρχει ο κώδικας για την τοποθέτηση των ιδιοτιμών μέσω της τεχνικής LQR, τεχνική που ελαχιστοποιεί ένα συγκεκριμένο κόστος που σχετίζεται με την εξίσωση Riccati. Μέσω, λοιπόν, της εντολής `icare()`, βρίσκουμε τον πίνακα κερδών $K_{LQ} = [2.4925 \quad 0.5223 \quad 122.4745]$ για τις δεδομένες τιμές των πινάκων που χρησιμοποιεί η `icare()` όπως φαίνονται στο αρχείο.

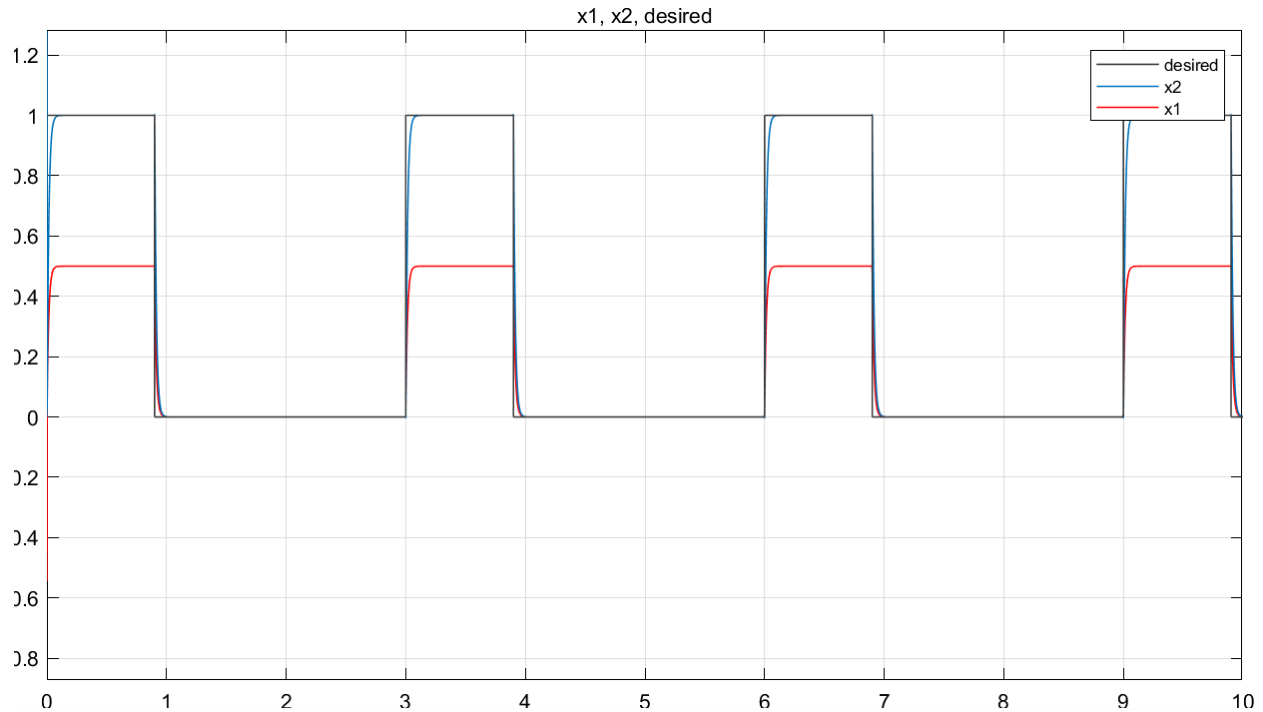
Οι νέες ιδιοτιμές του πίνακα $(A_{ag} - B_{ag}K_{LQ})$ είναι:

```
ans =
    1.0e+05 *
   -1.4104
   -0.0529
   -0.0007
```

Τώρα θα εφαρμόσουμε αυτόν τον ελεγκτή στο αρχικό σύστημα, το μη-γραμμικό, υποθέτοντας ότι η τάση μπορεί να είναι από 7 μέχρι 12V.

Άρα θα σχεδιάσουμε με την βοήθεια του Simulink ένα σύστημα που θα περιγράφει την απόκλιση μεταξύ της γραμμικής προσέγγισης και του μη-γραμμικού μας συστήματος.



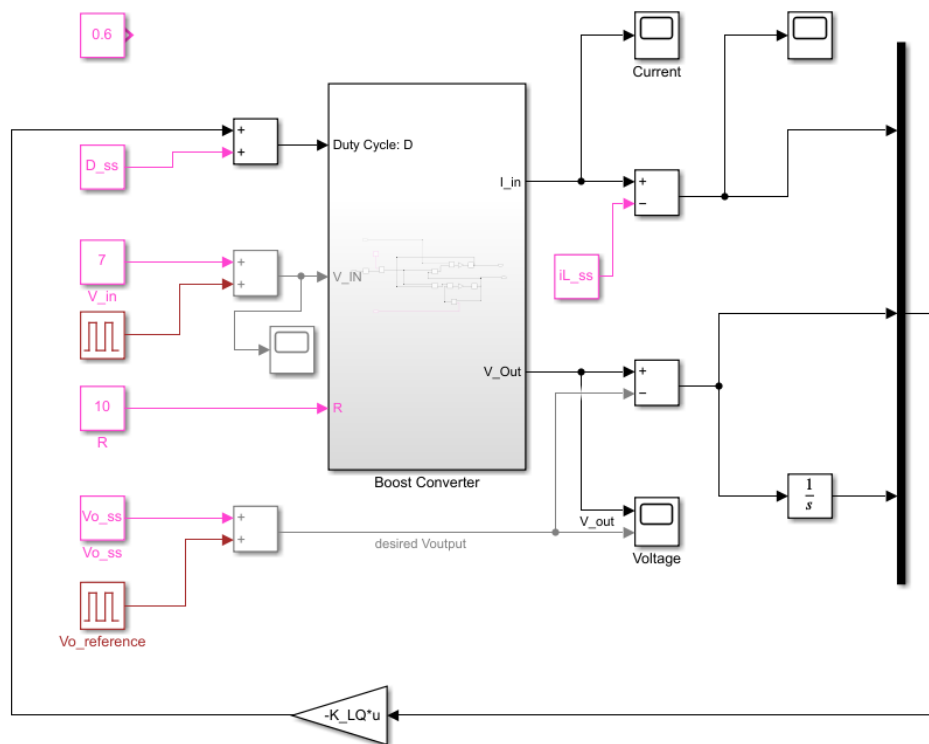


Όπως είδαμε, τόσο η συνάρτηση *icare()* όσο και η *place()* δίνουν ένα πολύ καλό αποτέλεσμα με την έννοια ότι η τάση εξόδου μας ακολουθεί την επιθυμητή τιμή ασυμπτωτικά. Αυτό που πρέπει να πούμε είναι ότι:

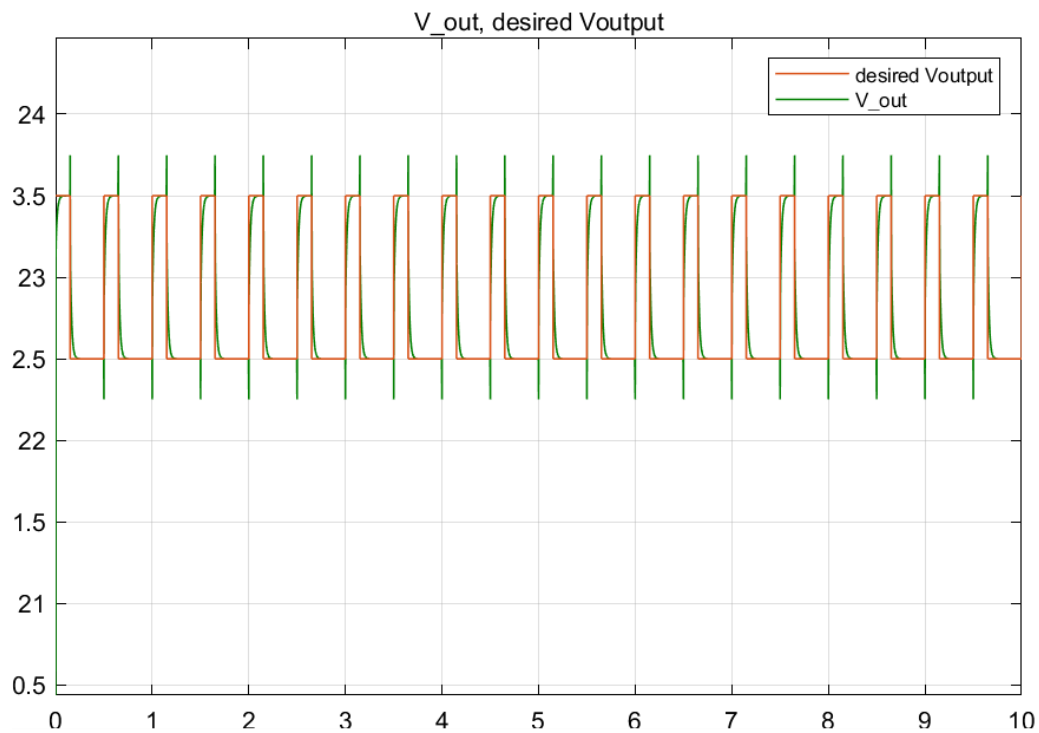
Η *place()* χρησιμοποιείται για να σχεδιάσει μια ανάδραση κατάστασης με τοποθέτηση πόλων κλειστού βρόχου σε επιθυμητές θέσεις με βάση τις εκάστοτε προδιαγραφές, υπολογίζοντας τα κατάλληλα κέρδη για να επιτευχθεί αυτό.

Η *icare()* χρησιμοποιείται για να σχεδιάσει βέλτιστους ελεγκτές βασιζόμενη στην ελαχιστοποίηση του κόστους σε LQR συστήματα ελέγχου. Λύνει δηλαδή την αλγεβρική εξίσωση Riccati, δίνοντας έτσι ένα πιο ακριβές αποτέλεσμα ειδικά όταν δεν γνωρίζουμε τις επιθυμητές θέσεις των πόλων.

Θα εφαρμόσουμε τώρα τον ελεγκτή που προέκυψε με την τελευταία μας σχεδίαση στο αρχικό μη-γραμμικό σύστημα πάλι με την βοήθεια του Simulink.



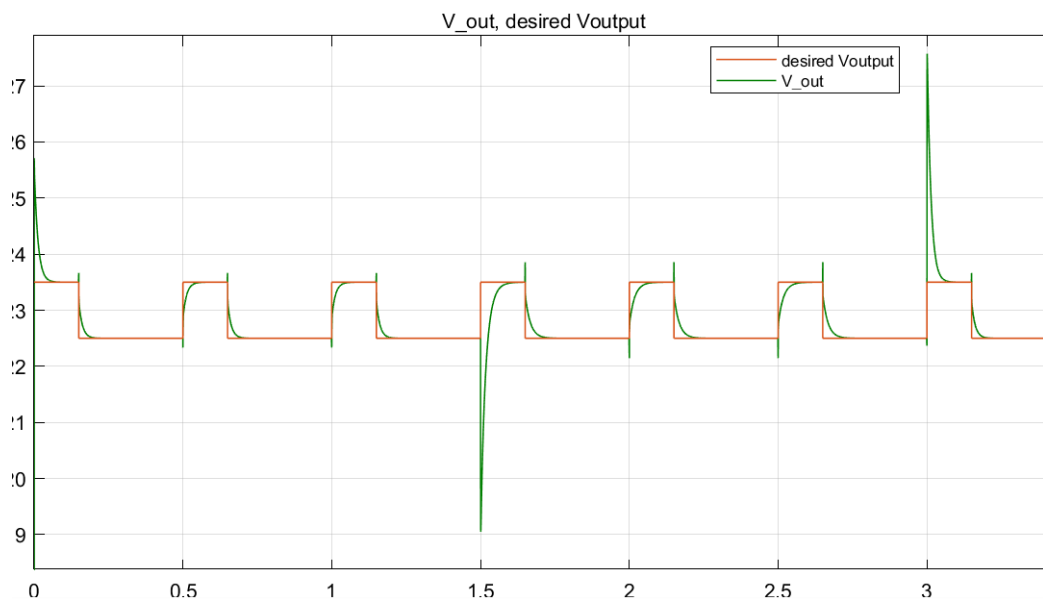
Μια πρώτη υλοποίηση μας έδωσε σαν αποτέλεσμα το ακόλουθο για την τάση εξόδου:



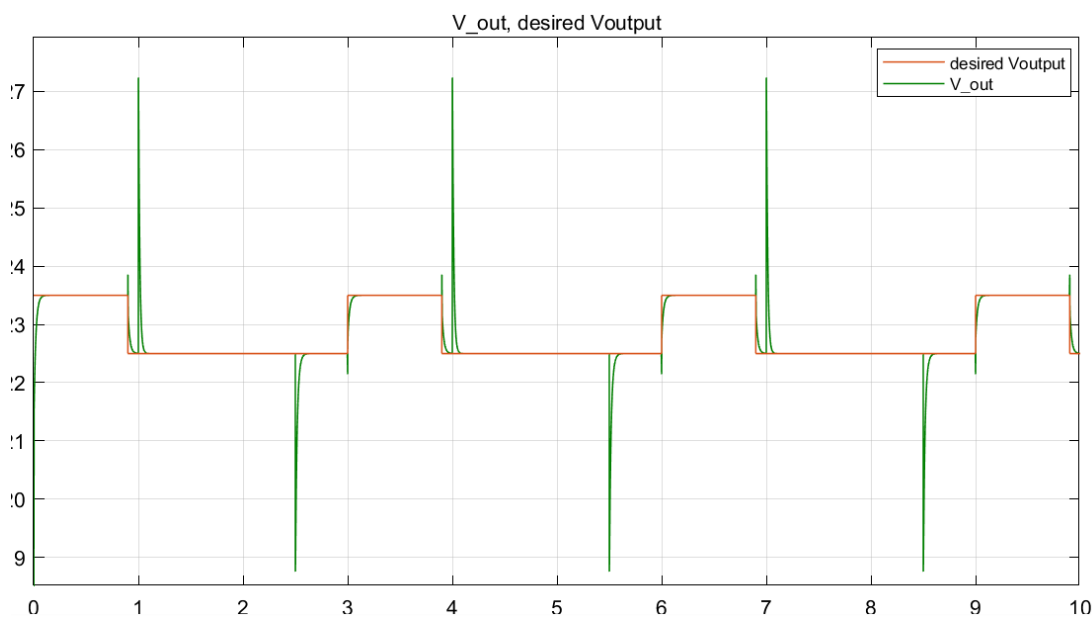
Βλέπουμε ότι παρόλο που η τάση εξόδου ακολουθεί αρκετά ικανοποιητικά την επιθυμητή τάση εξόδου, υπάρχουν κάποια spikes όταν γίνεται η αλλαγή της τιμής της. Αυτό οφείλεται

στο γεγονός ότι το σύστημα είναι μη-ελάχιστης φάσης (ασταθή μηδενικά) και το feedback που εφαρμόσαμε αλλά και γενικά ξέρουμε ότι δεν επηρεάζει τα μηδενικά. Άρα παραμένει το σύστημα μη-ελάχιστης φάσης και μετά την εφαρμογή του ελεγκτή. Μια λύση για το πρόβλημα αυτό θα ήταν το block 'rate limiter' προκειμένου οι αλλαγές να συμβαίνουν πιο αργά, με πιο ομαλό ρυθμό.

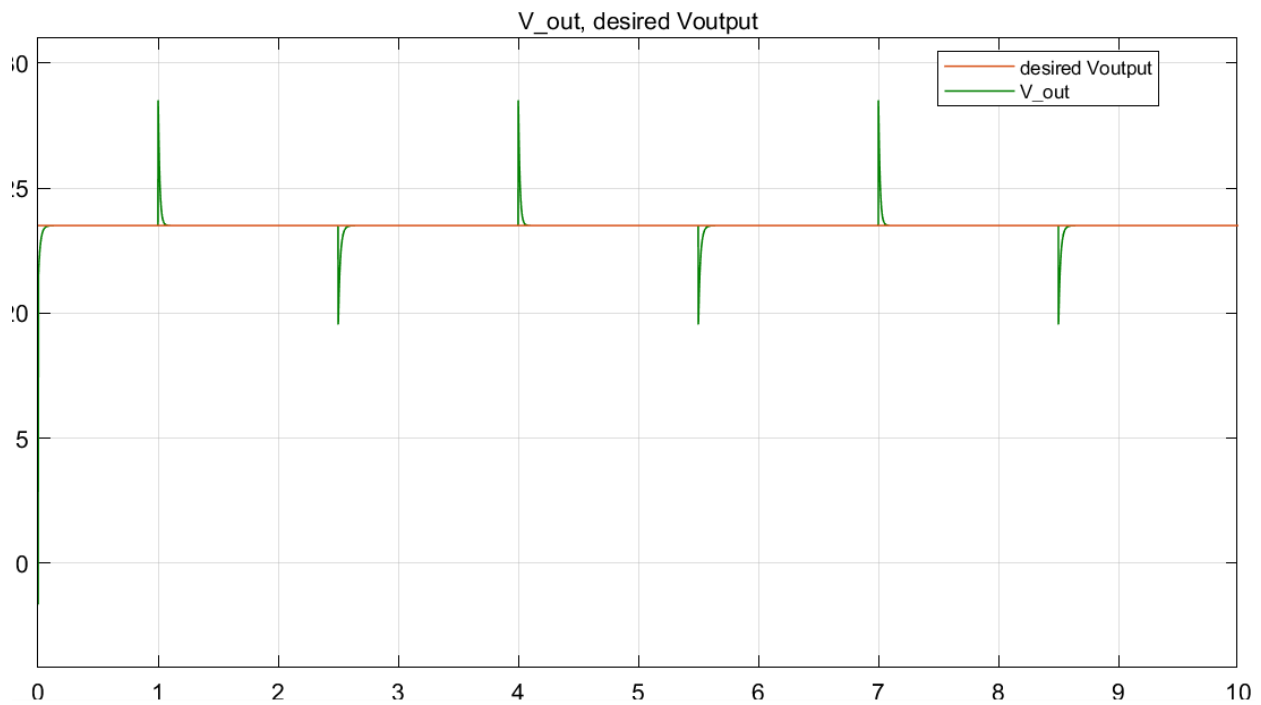
Αν προσθέσουμε και την διαταραχή της τάσης εισόδου τέτοια ώστε η τιμή της να κυμαίνεται από 7 έως 12V αυτό που θα πάρουμε είναι το ακόλουθο:



Αν βάλουμε την ίδια περίοδο στην τάση αναφοράς V_o^{ss} και στην διαταραχή της V_{in} ίση με 3 seconds, τότε παρατηρούμε ότι όταν η τάση εισόδου αλλάζει τιμή, αλλάζει στιγμιαία τιμή και η τάση εξόδου (spike), το οποίο λόγω του ελεγκτή αποσβένει πολύ γρήγορα.



Για το τελευταίο ερώτημα της εργασίας, προσθέτουμε μια step function σαν αναφορά στην τάση αναφοράς V_O^{ss} . Το αποτέλεσμα που παίρνουμε είναι:



Ερωτήσεις:

Εντολή ode45 (χρειαζόμαστε Lorentz μοντέλο?)