

**УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ**

Бојан Кнежевић

**РЕГУЛАЦИЈА БРЗИНЕ КОД
ЛИФТОВСКИХ ПОГОНА СА
КОНТРОЛОМ ТРЗАЈА**

семинарски рад

Бања Лука, октобар 2007.

**Тема: РЕГУЛАЦИЈА БРЗИНЕ КОД ЛИФТОВСКИХ ПОГОНА
СА КОНТРОЛОМ ТРЗАЈА**

**Кључне ријечи:
Електрични погон лифта
Регулација брзине
Контрола трзаја
Математички модел**

Ментор: проф. др Слободан Н. Вукосавић

**Студент:
Бојан Кнежевић**

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА ЗА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКУ

Предмет: РЕГУЛАЦИЈА ЕЛЕКТРОМОТОРНИХ ПОГОНА

Тема: РЕГУЛАЦИЈА БРЗИНЕ КОД ЛИФТОВСКИХ
ПОГОНА СА КОНТРОЛОМ ТРЗАЈА

Задатак: Дефинисати трзај код електромоторних погона и описати његов утицај на механички подсистем. Образложити идеалну карактеристику кретања лифта и реализовати регулациону структуру која обезбјеђује такву карактеристику. При томе посматрати електромоторни погон са асинхроним мотором и редуктором.

Ментор: проф. др Слободан Н. Вукосавић

Студент: Бојан Кнежевић (69/01)

Бања Лука, октобар 2007.

Садржај

1.	Увод	2
2.	Дијаграм кретања лифта	4
2.1	Дефиниција трзаја	4
2.2	Идеалан дијаграм лифта	4
2.3	Математички приказ идеалног дијаграма	8
2.3.1	Извођење математичког модела	8
2.3.2	Одређивање вриједности временских граница	13
3.	Симулација	14
3.1	Креирање С-функције	14
3.2	Креирање Симулинк модела	15
3.2.1	Модел мотора (у Симулинку)	15
3.2.2	Регулатор (у Симулинку)	16
3.3	Резултати симулације	17
4.	Закључак	24
5.	Литература	25
6.	Прилог	26
6.1	С-функција (bk_sf.m)	26
6.2	Скрипт програма (bk_skript.m)	28
6.3	Симулинк модел (bk_model.mdl)	30
6.3.1	bk_model/Subsystem.mdl	30
6.3.2	bk_model.mdl	31

1. УВОД

У овом раду представљена је физички и математички проблематика појаве трзаја код лифтова. Одређен је математички модел промјене брзине кретања лифта који обезбјеђује полазак и заустављање лифта са трзајем жељене вриједности¹.

Сви добијени изрази провјерени су на конкретном моделу векторски управљаног асинхроног мотора регулисаног по брзини. Провјера је вршена симулацијама понашања датог система при одређеној побуди у програмском пакету Матлаб (Matlab, toolbox Simulink). Референтну брзину, чији је облик одређен математичким функцијама, генерише блок са С-функцијом која је такође написана за ову намјену.

Најчешће рјешење за вертикални превоз путника и робе у стамбеним и пословним зградама представља електрични лифт². Његова конструкција није се битно мијењала још од времена када су конструисани први комерцијални лифтови овог типа. Оно што је константно унапређивано јесу погонске машине, управљачке структуре, сигурносни елементи као и издржљивост погона, његова дуготрајност и економичност. Посебно интересантан елемент модерних лифтова је комфор и удобност путника, а који је доведен у питање већ код брзих, а поготово код експресних лифтова.

Данас постоје лифтови чије номиналне брзине достижу и 10 m/s с циљем да се повећа њихова расположивост у високим пословним зградама са високом фреквенцијом саобраћаја. Код таквих лифтова при поласку и заустављању јавља се по амплитуди велик трзај који има неповољан временски облик и код путника може да изазове нелагодност па чак и да пређе вриједности које људски организам може да поднесе.

Контрола трзаја није битна само због путника и робе која се превози лифтовима. Неконтролисана вриједност трзаја има штетне утицаје и на електромоторни погон и механички систем погона, а посебно на ужницу и ужад која се убрзано троше јер долази до појаве проклизавања.

Проблем код обраде ове теме је што се постојећа литература врло мало бави овим питањем. Уопште, лифтовска постројења нису честа тема у литератури. У оно мало литературе која се бави овом тематиком, а која је обично старијег датума, наглашава се важност проблема изазваног трзајем али као могућност елиминисања његовог штетног утицаја наводи се само избор другог типа погонске машине [1] јер у то вријеме нису постојали (или нису били значајно уведени у примјену) напредни микропроцесорски начини управљања електромоторним погонима. То је условило да асинхрони мотор, који је данас због својих добрих особина доминантно примјењен у електромоторним погонима, потиснут неким сложенијим. То би у данашњим оквирима значило да се асинхрони мотор у лифтовским постројењима брзих и експресних лифтова не би ни користио.

¹ Трзај подешавамо на вриједност која није већа од максимално дозвољене, а није ни исувише мала јер тада достизање номиналне брзине траје дуже.

² Под појмом електричног лифта подразумевамо лифт са челичним ужадима код којег се пренос механичке снаге са погонске машине преко ужнице преноси на ужад посредством силе трења (фрикције). Поред овог типа лифтова постоје још и хидраулични лифтови који нису тема овог рада.

Код модерних система управљања електромоторним погонима можемо реализовати идеално кретање лифта са контролисаним трзајем и зато је идеја овог рада да се позабави том материјом, тим прије што се ни у пројектима данашњих лифтова не анализира појава трзаја, врло актуелна и оправдана.

Оправданости овог рада доприноси и чињеница да се појава трзаја не веже само за погон лифтова већ и за електромоторне погоне инсталиране у одређеним технолошким процесима.

2. ДИЈАГРАМ КРЕТАЊА ЛИФТА

У тачкама које слиједи дефинисан је трзај и дата основна поставка идеалног управљања лифтом које обезбјеђује контролу трзаја. Идеални дијаграм кретања лифта приказан је графички и описује промјене брзине, убрзања и трзаја у времену, а касније је изведен и приказан његов математички модел.

2.1 Дефиниција трзаја

Трзај, физички, представља брзину промјене убрзања. Односно, математички, први извод убрзања по времену:

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} = j. \quad (2.1)$$

У (2.1) са j је означен трзај изражен у $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^3}\right]$, а са α угаоно убрзање у $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}\right]$.

Између величина које карактеришу кретање лифта постоје поред (2.1) и зависности (2.2) и (2.3) које одређују начин и могућности регулације трзајем непосредно регулишући неку другу величину. Касније ће се видјети да је за то најподеснија угаона брзина. Те зависности су:

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega, \quad (2.2)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \alpha, \quad (2.3)$$

гдје је θ [rad] угао, односно положај, а ω $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$ угаона брзина. Пошто се код лифтова често оперише са линијским³ величинама, а не са величинама ротационог кретања у (2.4) дата је веза између ових величина:

$$\left[\begin{array}{c} \text{величина} \\ \text{линијског} \\ \text{кретања} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{полупречник} \\ \text{ужнице} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{величина} \\ \text{ротационог} \\ \text{кретања} \end{array} \right]. \quad (2.4)$$

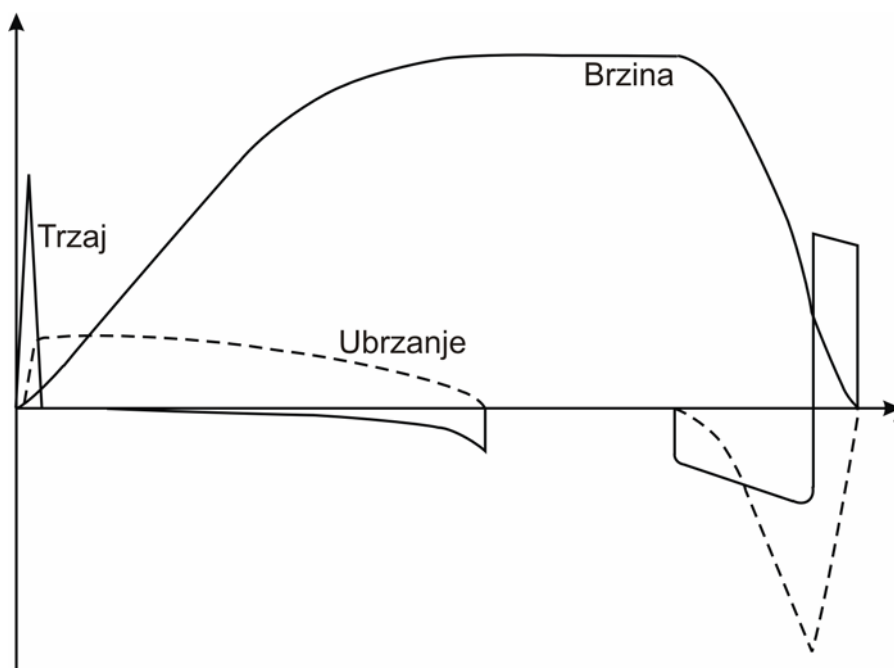
2.2 Идеалан дијаграм лифта

Код лифтова који имају мирно кретање, гдје су појаве трзаја при поласку и успорењу неосјетне, вријеме убрзања и успорења мора бити кратко. Оба ова захтјева су испуњена ако се брзина кабине убрзава и успорава константним промјенама, односно константним трзајем [1]. Из услова да је трзај константан произилази да се са повећањем брзине лифта све више може повећавати величина убрзања, а да притом не наступи осјећај наглог поласка.

³ Код лифта се величине као што су пређени пут (положај), брзина, убрзање и трзај односе на кабину која има линијско кретање па се и поменуте величине односе на линеарно кретање и изражавају се у [m], [m/s], [m/s²] и [m/s³], респективно.

Из горе наведеног можемо конципирати начело идеалног управљања које каже да захтјевима за великом брзином лифта може да удовољи само специјално управљање, које при највећем дозвољеном и константном трзају, дакле са убрзањем које расте са брзином вожње, одржава ток убрзања независно од оптерећења лифта [1].

На овако дефинисан захтјев, који се поставља погону лифта, свакако не може да одговори погон са директно напајаним асинхроним мотором са кратко спојеним ротором. Код овог погона дејствује полазни момент који при укључењу има високу вриједност да би за кратко вријеме дошло до повећања убрзања до максималне вриједности (слика 2.1). Дакле, настаје максимални трзај који се после достизања максималног убрзања смањује на малу вриједност.



Слика 2.1 – Карактеристика брзине лифта са нерегулисаним АМ

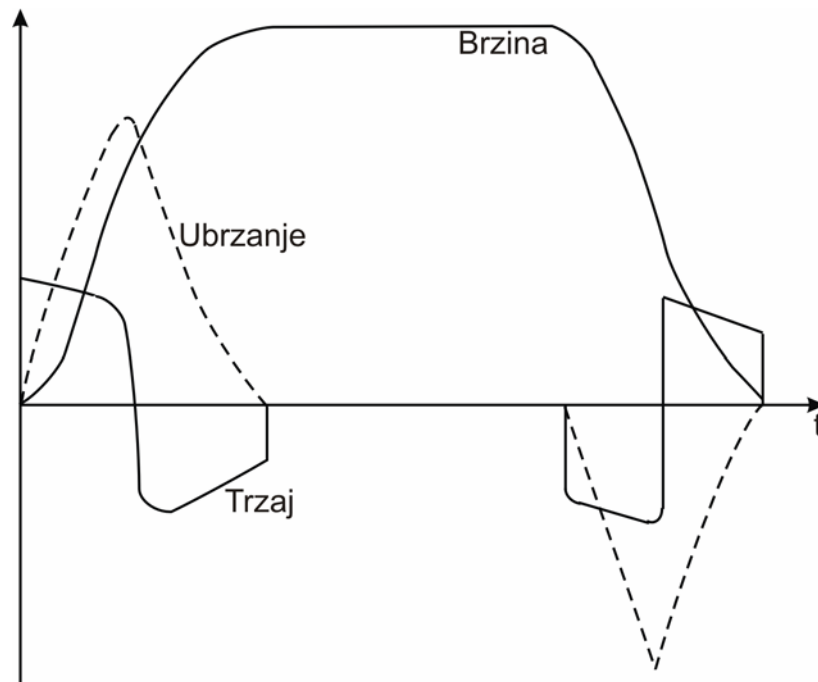
У зависности од полазног момента мотора, трзај само у малој мјери одступа од приказаних карактеристика али се овим управљањем не достиже полазна особина идеалног лифта. Ово се образлаже немогућношћу да се карактеристике полазног момента кратко спојеног мотора прилагоде потребној кривој убрзања као и тиме што су код овог погона убрзања и успорења у великој мјери зависна од терета у кабинџи, а чији се утицај не може одстранити.

Код асинхроних мотора са кавезним ротором тврди полазак се пригушује укључивањем статорских отпорника или уградњом додатне замајне масе. То значи да се или смањује момент убрзавања или се повећавају масе које треба убрзавати. У сваком случају смањује се трзајни врх али се зато продужава вријеме поласка па ова рјешења нису погодна за брзе лифтове.

Меки полазак без додавања замајних маса постиже се код мотора са намотаним ротором са отпорним упуштачем. Користи се многостепено упуштање којим се врши прилагођење момента поласка па лифт при свим оптерећењима меко полази. Али се ни у овом случају не могу постићи идеалне околности јер упуштачи не владају у довољној мјери полазним моментом.

Код погона са Вард-Леонардовом групом постиже се полазак који је приближан идеалном (слика 2.2). Убрзање се стално мјења и у току залетања

дозвољени трзај пада на нулу па је вријеме убрзања врло кратко што резултује да се при свим брзинама постиже најбржи полазак.



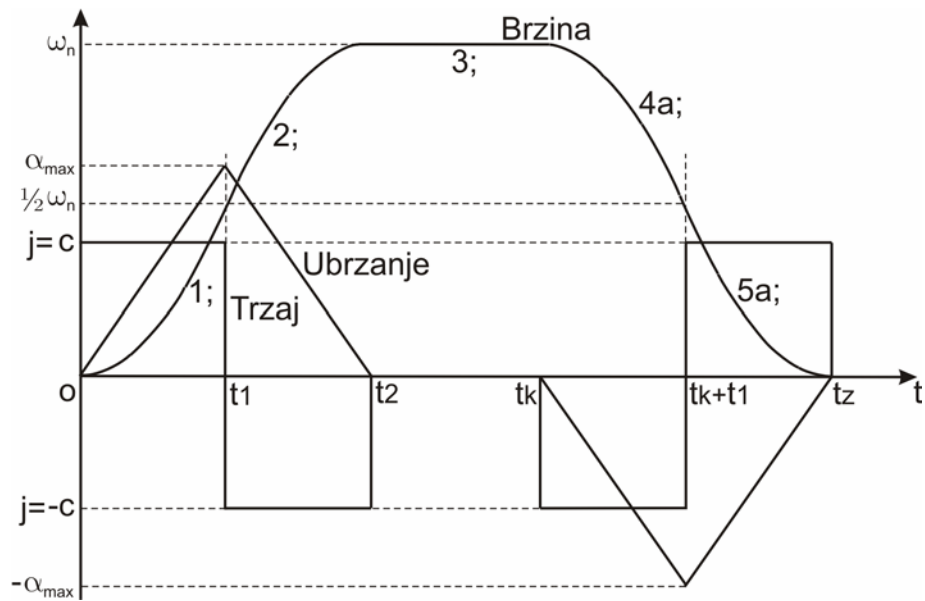
Слика 2.2 – Карактеристика брзине лифта са Вард-Леонардовом групом

Посебан проблем је што се сви ови погони различито понашају при различитим оптерећењима, односно, њихова карактеристика се "спушта" са порастом оптерећења.

Додавањем обртних (замајних) маса спрјечава се искориштавање пуне брзине мотора односно лифта, јер са растућим временом убрзања и кочења снижава се средња брзина, а тиме се и вријеме вожње повећава. Ово се одражава још неповољније уколико имамо већи број вожњи на час.

Из овог прегледа и поставке идеалног управљања закључујемо да ниједно рјешење, без напредног система управљања, не задовољава идеалну карактеристику кретања лифта.

На слици 2.3 приказане су идеалне временске зависности брзине, убрзања и трзаја лифта за једну вожњу.



Слика 2.3 – Идеална карактеристика брзине, убрзања и трзаја

Са посматраног дијаграма уочавамо карактеристичне периоде у једној возњи:

- убрзавање при поласку – до тренутка t_2 ,
- кретање константном брзином (номиналном) – од тренутка t_2 до тренутка кочења t_k и
- успоравање до заустављања – од тренутка t_k до тренутка заустављања t_z .

Као што се види, трзај је константан и поприма двије вриједности једнаке по апсолутном износу.

2.3 Математички приказ идеалног дијаграма

2.3.1 Извођење математичког модела

Да би смо могли реализовати управљање лифтом, како је наведено у горњим тачкама, у управљачкој структури морамо имати генерисање референтне брзине која одговара датој карактеристици. То можемо реализовати ако дати дијаграм представимо математичким моделом у којем егзистира и који одређује задана вриједност трзаја.

На слици 2.3 можемо уочити пет временских интервала:

- 1;

Овај период дефинише се у временским границама од 0 до t_1 . У том временском периоду трзај треба да има позитивну константну вриједност:

$$j = C. \quad (2.5)$$

Користећи (2.1) можемо писати:

$$\alpha = \int j dt = Ct + A_1 \quad (2.6)$$

гдје је A_1 интеграциона константа која се одређује из почетних услова:

$$t = 0 \Rightarrow \alpha = 0 \Rightarrow A_1 = 0, \quad (2.7)$$

па имамо:

$$\alpha = Ct. \quad (2.8)$$

Из (2.3), а уважавајући (2.8) имамо:

$$\omega = \int \alpha dt = \frac{C}{2} t^2 + B_1, \quad (2.9)$$

а за константу, слично као у (2.7), добијамо да је:

$$t = 0 \Rightarrow \omega = 0 \Rightarrow B_1 = 0, \quad (2.10)$$

па је коначно израз за брзину:

$$\omega_1 = \frac{C}{2} t^2. \quad (2.11)$$

У (2.11) јасно се види да је брзина функција времена која је директно одређена заданом вриједношћу трзаја.

- 2;

Сада по истом принципу можемо одредити израз за брзину у временском интервалу од t_1 до $t_2 = 2t_1$ у којем трзај поприма негативну вриједност:

$$j = -C. \quad (2.12)$$

Пратећи поступак слично као у (2.6)- (2.10) пишемо:

$$\alpha = \int j dt = -Ct + A_2, \quad (2.13)$$

$$t = t_1 \Rightarrow \alpha = \alpha_{\max}, \quad (2.14)$$

гдје је :

$$\alpha_{\max} = Ct_1. \quad (2.15)$$

Слиједи:

$$\alpha_{\max} = -Ct_1 + A_2 \Rightarrow A_2 = 2Ct_1, \quad (2.16)$$

$$\omega = \int \alpha dt = -\frac{C}{2}t^2 + 2Ct_1t + B_2, \quad (2.17)$$

Из почетних услова:

$$t = t_1 \Rightarrow \omega = \frac{\omega_n}{2} = \frac{1}{2}, \quad (2.18)$$

имамо:

$$B_2 = \frac{1}{2} - \frac{3}{2}Ct_1^2. \quad (2.19)$$

Коначно:

$$\omega_2 = -\frac{C}{2}t^2 + 2Ct_1t + \frac{1}{2} - \frac{3}{2}Ct_1^2. \quad (2.20)$$

- 3;

У овом периоду (све до тренутка у којем почиње успоравање t_k) брзина има трајај једнак нули, а брзину константну и једнаку номиналној⁴, односно:

$$j = 0 \Rightarrow \omega_3 = \omega_n = 1. \quad (2.21)$$

- 4а;

Период од t_k до t_k+t_1 означен са 4а односи се на случај када са номиналне брзине лифт почиње да успорава. Случај када лифт треба да успорава, а да није достигао номиналну брзину биће дефинисан касније. Поштујући поступак као у претходним случајевима можемо писати редом:

$$j = -C, \quad (2.22)$$

$$\alpha = \int j dt = -Ct + A_{4a}, \quad (2.23)$$

$$t = t_k \Rightarrow \alpha = 0 \Rightarrow A_{4a} = Ct_k, \quad (2.24)$$

$$\alpha = -Ct + Ct_k. \quad (2.25)$$

Из овог за брзину имамо:

$$\omega = \int \alpha dt = -\frac{C}{2}t^2 + Ct_kt + B_{4a}, \quad (2.26)$$

$$t = t_k \Rightarrow \omega = \omega_n = 1. \quad (2.27)$$

Коначно:

⁴ Под појмом номинална брзина у овом раду подразумева се номинална брзина лифта (кабине). Нпр. 1.6m/s, 3m/s итд.

$$\omega_{4a} = -\frac{C}{2}t^2 + Ct_k t - \frac{C}{2}t_k^2 + 1. \quad (2.28)$$

- 5a;

Као код 4a и овде добијени израз вриједи у случају када је лифт убрзао до номиналне брзине. Тада је за временске границе од t_k+t_1 до t_z :

$$j = C. \quad (2.29)$$

Имамо редом:

$$\alpha = \int j dt = Ct + A_{5a}, \quad (2.30)$$

гдје се A_5 добија из услова:

$$t = t_k + t_1 \Rightarrow \alpha = -\alpha_{\max} = -Ct_1, \quad (2.31)$$

па је:

$$A_{5a} = -Ct_k - 2Ct_1, \quad (2.32)$$

из чега слиједи да је убрзање:

$$\alpha = Ct - Ct_k - 2Ct_1. \quad (2.33)$$

Попут једначина (2.9), (2.17) или (2.26) имамо и овде:

$$\omega = \int \alpha dt = \frac{C}{2}t^2 - (Ct_k + 2Ct_1)t + B_{5a}, \quad (2.34)$$

$$t = t_k + t_1 \Rightarrow \omega = \frac{\omega_n}{2} = \frac{1}{2}, \quad (2.35)$$

$$B_{5a} = \frac{C}{2}t_k^2 + 2Ct_k t_1 + \frac{3C}{2}t_1^2 + \frac{1}{2}, \quad (2.36)$$

па за брзину имамо коначно:

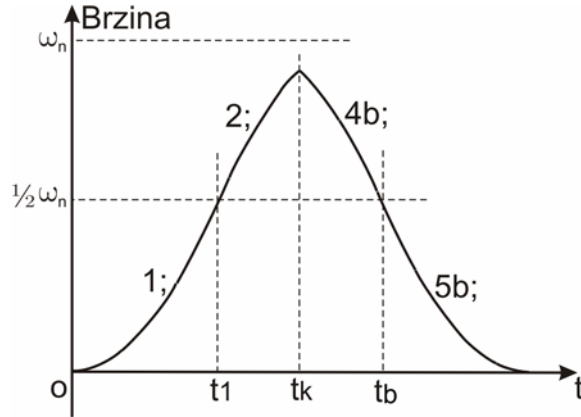
$$\omega_{5a} = \frac{C}{2}t^2 - (Ct_k + 2Ct_1)t + \frac{C}{2}t_k^2 + 2Ct_k t_1 + \frac{3C}{2}t_1^2 + \frac{1}{2}. \quad (2.37)$$

Сви горе изведени изрази, као што је већ напоменуто, вриједи у случају у којем је лифт достигао номиналну брзину прије успоравања.

Када лифт треба да почне да успорава, а да још није постигао номиналну брзину, представља посебан случај који је сасвим реалан и представља ситуацију у којој кабина лифта прелази пут између двије сусједне станице. То растојање сувише је кратко да би лифт развио пуну брзину. На старијим моделима лифтова та ситуација рјешавана је примјеном погона са три брзине. Најспорија се користи у поменутом случају, а друге двије за прелазак путање двије и више станица [1].

Ми треба да представимо математички и ову карактеристику. На сликама 2.4 и 2.5 представљена су графички, са назначеним карактеристичним тачкама, два различита случаја. Први се односи на успоравање када је постигнута брзина

при залетању већа од половине номиналне (криве 4б и 5б), а други када је постигнута брзина мања од те вриједности (крива 5б):



Слика 2.4 – Карактеристика брзине за случај $t_k < t_2$

- 4б;

Овај случај односи се на интервал од t_k до $2t_k - t_1$ (слика 2.4). Друга временска граница добија се из услова да је:

$$t_k - t_1 = t_b - t_k. \quad (2.38)$$

У овом периоду трзај је негативан као и у случају 4а на слици 2.1 па имамо:

$$j = -C, \quad (2.39)$$

из чега је убрзање са почетним условима:

$$\alpha = -Ct + A_{4b}, \quad (2.40)$$

$$t = t_k \Rightarrow \alpha = -\alpha_2 = Ct - 2Ct_1, \quad (2.41)$$

$$A_{4b} = -2Ct_1 + 2Ct_k, \quad (2.42)$$

$$\alpha = -Ct - 2Ct_1 + 2Ct_k. \quad (2.43)$$

За брзину са почетним условима имамо:

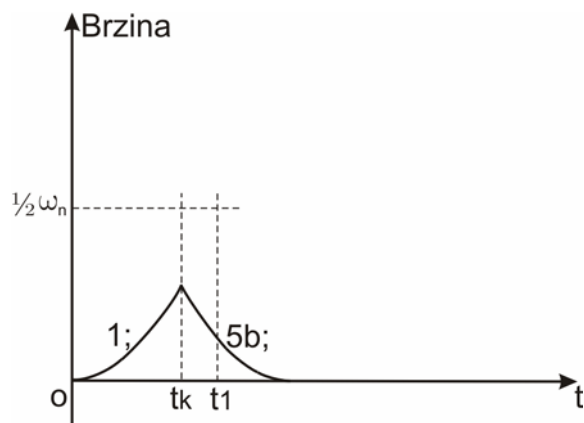
$$\omega = \int \alpha dt = -\frac{C}{2}t^2 + (2Ct_k - 2Ct_1)t + B_{4b}, \quad (2.44)$$

$$t = t_k \Rightarrow \omega = \omega_2 = -\frac{C}{2}t^2 + 2Ct_1t + \frac{1}{2} - \frac{3}{2}Ct_1^2, \quad (2.45)$$

$$B_{4b} = 4Ct_k t_1 - \frac{3C}{2}t_1^2 - 2Ct_k^2 + \frac{1}{2}. \quad (2.46)$$

Израз за брзину коначно је:

$$\omega_{4b} = -\frac{C}{2}t^2 + (2Ct_k - 2Ct_1)t + 4Ct_k t_1 - \frac{3C}{2}t_1^2 - 2Ct_k^2 + \frac{1}{2}. \quad (2.47)$$



Слика 2.5 – Карактеристика брзине за случај $t_k < t_1$

- 5б;

Сада ћемо извести израз за брзину који се примјењује у два случаја: када кочење почиње са брзине веће од половине номиналне (са криве 4б-слика 2.4) и са брзине мање од половине номиналне (са криве 1-слика 2.5). При томе временске границе су од t_k до $2t_k$ и од $2t_k - t_1$ до $2t_k$, респективно. Трзај у овом случају је позитиван:

$$j = C. \quad (2.48)$$

Као у горе већ описаном поступку имамо редом:

$$\alpha = Ct + A_{5b}, \quad (2.49)$$

$$t = t_k \Rightarrow \alpha = -\alpha_1 = -Ct, \quad (2.50)$$

$$A_{5b} = -2Ct_k, \quad (2.51)$$

па је убрзање:

$$\alpha = Ct - 2Ct_k. \quad (2.52)$$

За брзину имамо:

$$\omega = \int \alpha dt = \frac{C}{2}t^2 - 2Ct_k t + B_{5b}, \quad (2.53)$$

$$t = t_k \Rightarrow \omega = \omega_1 = \frac{C}{2}t_k^2, \quad (2.54)$$

$$B_{5b} = 2Ct_k^2. \quad (2.55)$$

Коначан израз за брзину је:

$$\omega_{5b} = \frac{C}{2}t^2 - 2Ct_k t + 2Ct_k^2. \quad (2.56)$$

2.3.2 Одређивање вриједности временских граница

У тачки 2.3 изведени су изрази за брзину у којима егзистирају константе које су димензија времена. На сликама 2.3, 2.4 и 2.5 као и у границама по времену на које се односе изрази за брзину такође се појављују те константе и то t_1 , t_2 и t_k .

Константа t_k представља тренутак у ком управљачка структура лифта издаје наредбу да кабина почне успоравати до самог заустављања па се стога она уноси у математички модел као параметар, а не као резултат израчунавања. То је учињено да би се више простора у раду могло посветити заданој теми трзаја. У неком опширнијем раду који би се бавио овом проблематиком овај тренутак би био резултат неког другог алгоритма, као што је програм за одређивање положаја кабине, а у том случају параметар који би се уносио у модел била би жељена дестинација (спрат).

Константа t_2 представља тренутак када је постигнута номинална брзина и она је по вриједности једнака $2t_1$.

Из горе наведеног произилази да је потребно одредити само тренутак t_1 (тренутак у којем је брзина једнака половини номиналне брзине при убрзавању) да би једначине брзине из тачке 2.3 биле потпуно одређене. Одређивање поменутог тренутка можемо извршити полазећи од израза (2.11) у који уврштавамо:

$$t = t_1 \Rightarrow \omega_1 = \frac{\omega_n}{2} = \frac{1}{2}, \quad (2.57)$$

и добијамо за t_1 да је:

$$t_1 = \frac{1}{\sqrt{C}}, \quad (2.58)$$

а за t_2 имамо:

$$t_2 = \frac{2}{\sqrt{C}}. \quad (2.59)$$

3. СИМУЛАЦИЈА

3.1 Креирање С-функције

За провјеру и графички приказ горе изложене материје користићемо програмски пакет Матлаб и његову групу алата Симулинк (Matlab, toolbox Simulink). Да би смо то могли извести најподесније је да формирамо С-функцију која ће генерисати референтну брзину на основу изведеног математичког модела.

С-функције у Матлабу могу да се креирају на два начина. Први начин за њено креирање је као М-фајл, а други као МЕХ-фајл. Разлика у ова два приступа је у томе што се код првог алгоритам пише у Матлабовом М језику, а код другог у једном од познатих програмских језика. Матлаб посједује компајлере за програмске језике Фортран, Ц, Ц++ и Ада.

Предност М-фајлова је у брзини извршавања и лакшем приступу Матлабовим и Симулинк функцијама док је основна предност МЕХ-фајлова свестраност, већи број callbackова и могућност реализације функција које су недоступне М-фајловима захваљујући приступу SimStruct функцијама.

С обзиром да М-фајл С-функција сасвим задовољава наше потребе у овом случају бирамо управо тај тип С-функције.

За писање програма модел добијен у глави 2 морамо прилагодити уважавајући (2.58) и (2.59) и морамо одредити прецизније услове за извршавање појединих израза. Прилагођен математички модел са утврђеним условима дат је у једначинама (3.1)-(3.14).

- 1;

$$\text{Услов:} \quad t \geq 0 \wedge t < \frac{1}{\sqrt{C}} \wedge t < t_k. \quad (3.1)$$

$$\text{Функција:} \quad \omega_1 = \frac{C}{2} t^2. \quad (3.2)$$

- 2;

$$\text{Услов:} \quad t \geq \frac{1}{\sqrt{C}} \wedge t < \frac{2}{\sqrt{C}} \wedge t < t_k. \quad (3.3)$$

$$\text{Функција:} \quad \omega_2 = -\frac{C}{2} t^2 + 2\sqrt{C}t - 1. \quad (3.4)$$

- 3;

$$\text{Услов:} \quad t \geq \frac{2}{\sqrt{C}} \wedge t < t_k. \quad (3.5)$$

$$\text{Функција:} \quad \omega_3 = 1. \quad (3.6)$$

- 4а;

$$\text{Услов:} \quad t \geq t_k \wedge t < t_k + \frac{1}{\sqrt{C}} \wedge t_k > \frac{2}{\sqrt{C}}. \quad (3.7)$$

Функција:
$$\omega_{4a} = -\frac{C}{2}t^2 + Ct_k t - \frac{C}{2}t_k^2 + 1. \quad (3.8)$$

- 4б;

Услов:
$$t \geq t_k \wedge t < 2t_k - \frac{1}{\sqrt{C}} \wedge t_k > \frac{1}{\sqrt{C}} \wedge t_k \leq \frac{2}{\sqrt{C}}. \quad (3.9)$$

Функција:
$$\omega_{4b} = -\frac{C}{2}t^2 + (2Ct_k - 2\sqrt{C})t + 4\sqrt{C}t_k - 2Ct_k^2 - 1. \quad (3.10)$$

- 5а;

Услов:
$$t \geq t_k + \frac{1}{\sqrt{C}} \wedge t_k > \frac{2}{\sqrt{C}}. \quad (3.11)$$

Функција:
$$\omega_{5a} = \frac{C}{2}t^2 - (Ct_k + 2\sqrt{C})t + \frac{C}{2}t_k^2 + 2\sqrt{C}t_k + 2. \quad (3.12)$$

- 5б;

Услов:
$$t \geq t_k \wedge t \leq 2t_k \wedge t_k \leq \frac{1}{\sqrt{C}} \vee t \geq 2t_k - \frac{1}{\sqrt{C}} \wedge t \geq t_k \wedge t_k > \frac{1}{\sqrt{C}} \wedge t_k \leq \frac{2}{\sqrt{C}}. \quad (3.13)$$

Функција:
$$\omega_{5b} = \frac{C}{2}t^2 - 2Ct_k t + 2Ct_k^2. \quad (3.14)$$

Комплетна С-функција дата је у прилогу 6.1.

3.2 Креирање Симулинк модела

С-функцијом генерисану референтну вриједност брзине доводимо на брзински регулисан модел векторски управљаног асинхроног мотора.

3.2.1 Модел мотора (у Симулинку)

Модел мотора је једноставан (једноставнији и од модела мотора за једносмјерну струју) захваљујући распрегнутом управљању флуксом и моментом, као и због струјног напајања [2].

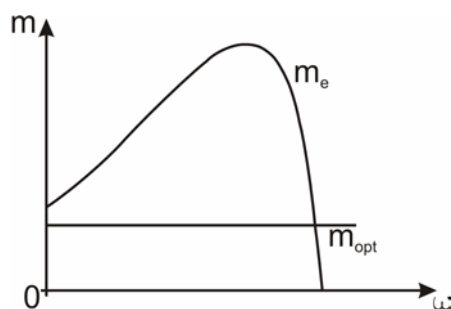
Код погона лифта нема потребе за радом у подручју слабљења поља па је то још једно поједностављење. Због тога се за компоненту струје статора по d-оси уврштава константна вриједност која одговара успостављању номиналног флукса у машини, а регулише се само момент посредством регулације компоненте струје статора по q-оси. Референца за q компоненту струје статора добија се на излазу регулатора брзине.

Потребан момент мотора за дати момент оптерећења добија се из Њутнове једначине кретања:

$$T_m \frac{d\omega}{dt} = m_e - m_{opt}. \quad (3.15)$$

Момент оптерећења, m_{opt} , је константна величина јер се код гравитационе карактеристике момент не мјења са брзином (Слика 3.1). За исто оптерећење (исту масу терета у кабини) вриједност момента оптерећења се разликује у моторном и генераторском режиму за момент трења.

Због природе лифта погон ради у четири квадранта. Момент оптерећења има позитивну и негативну вриједност, а брзина има оба смјера.



Слика 3.1 – Механичка карактеристика AM за моторни режим

Уврштавајући једначине (3.2), (3.4), (3.6), (3.8) и (3.12) у (3.15) можемо добити изразе за момент мотора у функцији времена:

- 1;

$$m_{e1} = T_m Ct + m_{opt}, \quad (3.16)$$

- 2;

$$m_{e2} = -T_m Ct + 2T_m \sqrt{C} + m_{opt}, \quad (3.17)$$

- 3;

$$m_{e3} = m_{opt}, \quad (3.18)$$

- 4а;

$$m_{e4a} = -T_m Ct + T_m Ct_k + m_{opt}, \quad (3.19)$$

- 5а;

$$m_{e5a} = T_m Ct - T_m (Ct_k + 2\sqrt{C}) + m_{opt}. \quad (3.20)$$

Максимална вриједност електричног момента, по апсолутној вриједности, која се јавља при максималном оптерећењу (оптерећеност лифта са максималном носивошћу) износи:

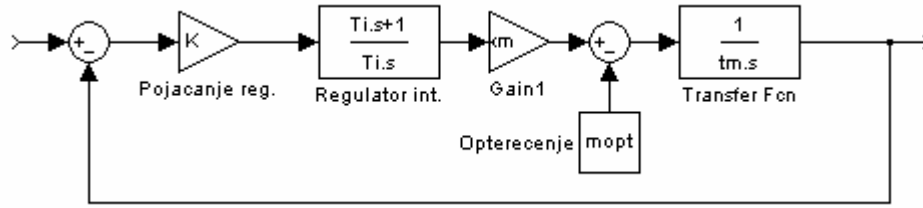
$$m_{e\max} = T_m \sqrt{C} + m_{opt,\max}. \quad (3.21)$$

3.2.2 Регулатор (у Симулинку)

За регулацију брзине користимо пропорционално-интеграциони регулатор (PI-регулатор) који комбинује добре особине пропорционалног и интеграционог регулатора [2]. Његова преносна функција гласи:

$$F_{pi}(p) = K_p \frac{1 + pT_i}{pT_i}, \quad (3.22)$$

гдје је K_p појачање, а T_i временска константа интеграције. Они се одређују када се формира функција преноса комплетног система што је приказано на слици 3.2.



Слика 3.2 – Модел мотора и регулатора са повратном везом

Функција спрегнутог преноса система са слике 3.2 гласи:

$$F(p) = \frac{K_m K + p K_m K T_i}{p^2 T_m T_i + p K_m K T_i + K_m K}, \quad (3.23)$$

гдје је:

$$K_m = \frac{M^2}{M + L_r'} i_{ds}, \quad (3.24)$$

а M и L_r' индуктивности.

Карактеристичну једначину можемо представити у облику:

$$p^2 + p \frac{K_m K}{T_m} + \frac{K_m K}{T_m T_i} = p^2 + p 2\zeta\omega_n + \omega_n^2, \quad (3.25)$$

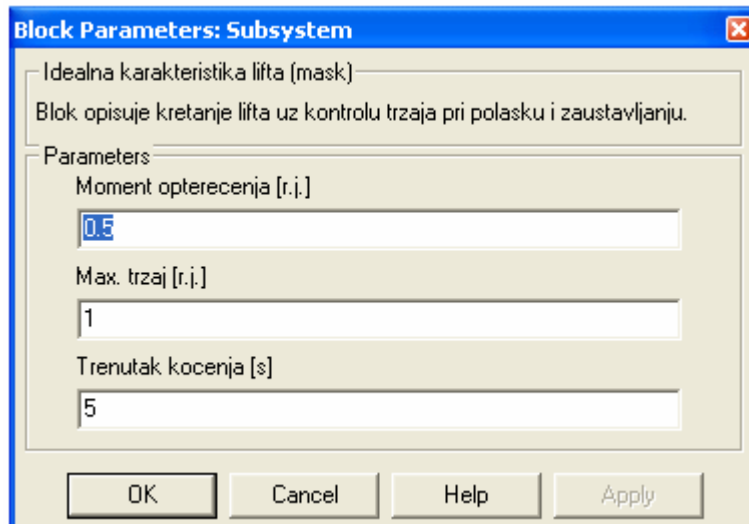
гдје се за фактор релативног пригушења ζ бира вриједност блиска јединици, а појачање регулатора се у том случају одређује изразом:

$$K = \frac{4T_m \zeta^2}{K_m T_i}. \quad (3.26)$$

Цјелокупан Симулинк модел приказан је у прилогу 6.3.

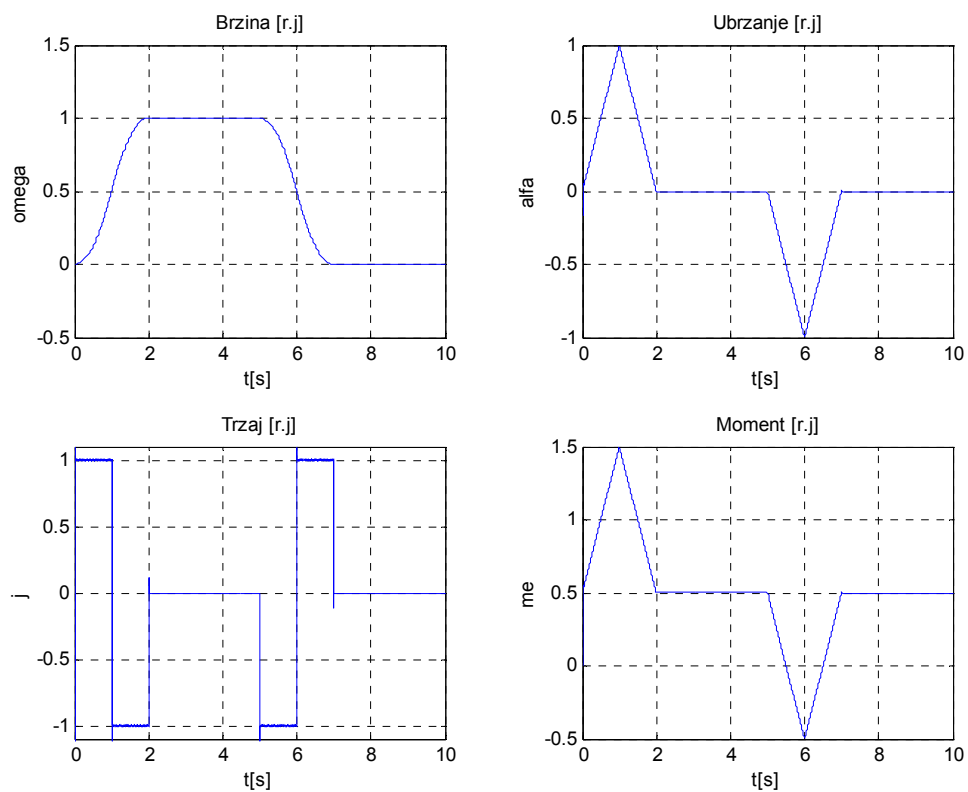
3.3 Резултати симулације

Симулација реализованог модела стартује уносом команде за позивање М-фајл скрипта `bk_skript` (који је представљен у прилогу 6.2) у командном прозору Матлаба. Параметри модела подешавају се у дијалог прозору који је приказан на слици 3.3. Као што се види са слике постоји могућност директног постављања вриједности момента оптерећења и максималног дозвољеног трзаја у релативним јединицама као и тренутак у којем почиње кочење у секундама. Код постављања овог времена треба узети у обзир укупно трајање симулације које је у овом случају подешено на десет секунди.



Слика 3.3 – Дијалог прозор за унос параметара

По завршетку симулације добијамо графички приказ резултата који су приказани на наредним сликама.



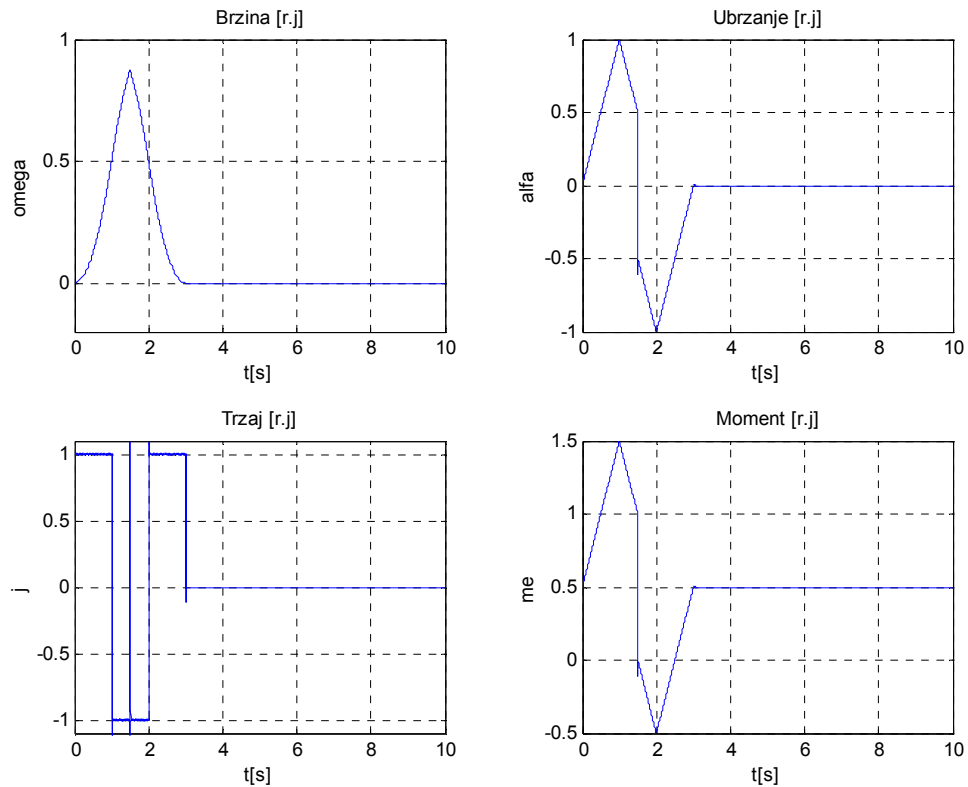
Слика 3.4 – Резултати симулације за вријеме кочења подешено на 5s

На слици 3.4 приказане су графички брзина, убрзање, трзај и електрични момент за случај када је лифт достигао номиналну брзину прије постављања захтјева за заустављање. То одговара случају када је лифт прешао пут више од растојања једне станице.

Са прва три графика можемо примјетити да дате величине потпуно одговарају оним датим на слици 2.3 што је и био задатак.

Приказана временска зависност električnog momenta potпуно је у складу са формулама (3.16)-(3.20) као и са формулом (3.21).

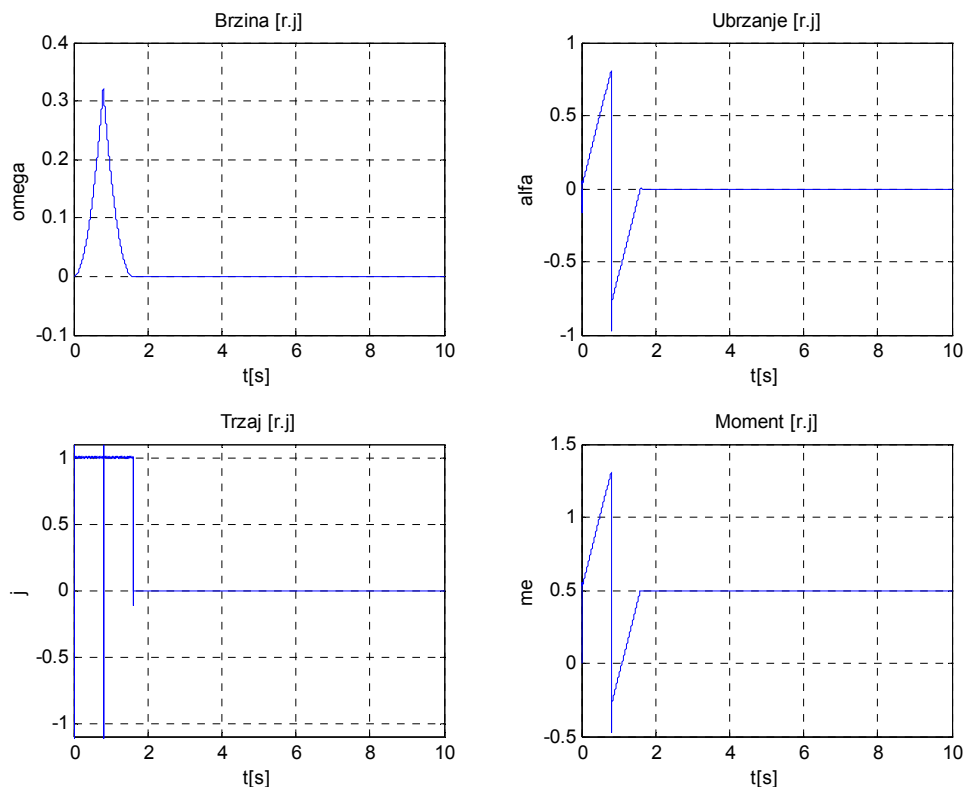
На слици 3.5 приказане су исте величине као и на слици 3.4 и са истим параметрима али за случај када је лифт постигао брзину већу од половине номиналне, а мању од номиналне у тренутку када је постављен захтјев за заустављањем.



Слика 3.5 – Резултати симулације за вријеме кочења подешено на 1.5s

И у овом случају добијени резултати потпуно су у складу са изведеним формулама (2.47) и (2.56) односно, сликом 2.4.

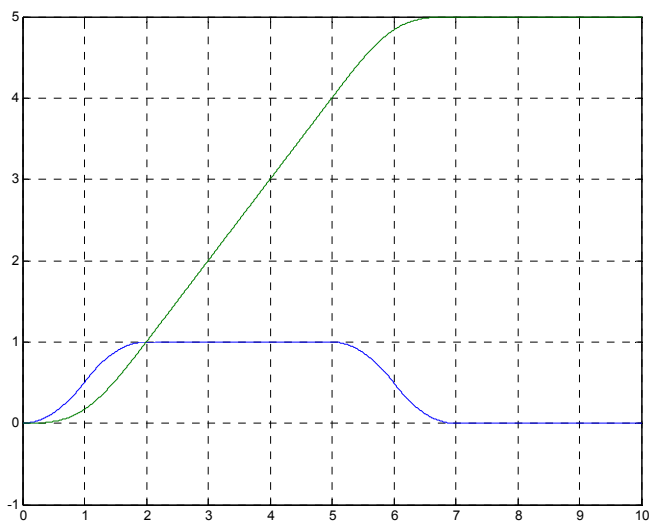
На сликама 3.4 и 3.5 као и на наредним сликама 3.6 и 3.10 може се примјетити да се код убрзања, а посебно код трзаја, при наглим прелазима са једне на другу вриједност јављају мањи или већи скокови. Они су последица њиховог израчунавања у моделу диференцирањем величине из које се добијају, а у складу са формулама (2.1) и (2.3). То је у директној вези са одабраним нумеричким поступком којим се врши израчунавање резултата у Симулинк моделу.



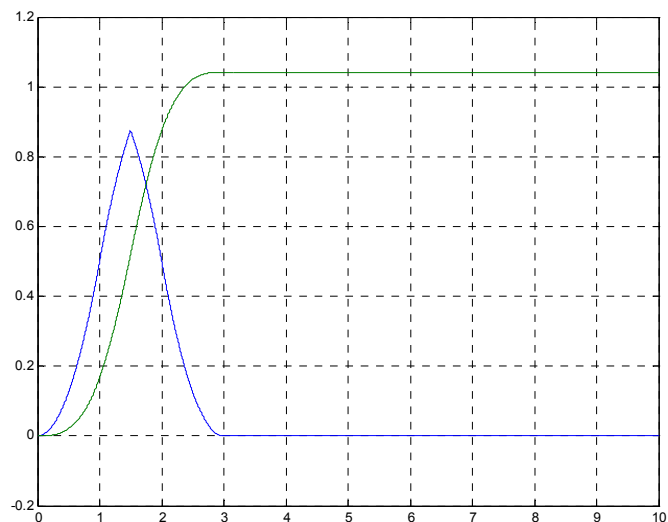
Слика 3.6 – Резултати симулације за вријеме кочења подешено на 0.8s

Резултати на слици 3.6 су још једна потврда регуларности математичког модела изведеног у параграфу 2.3.

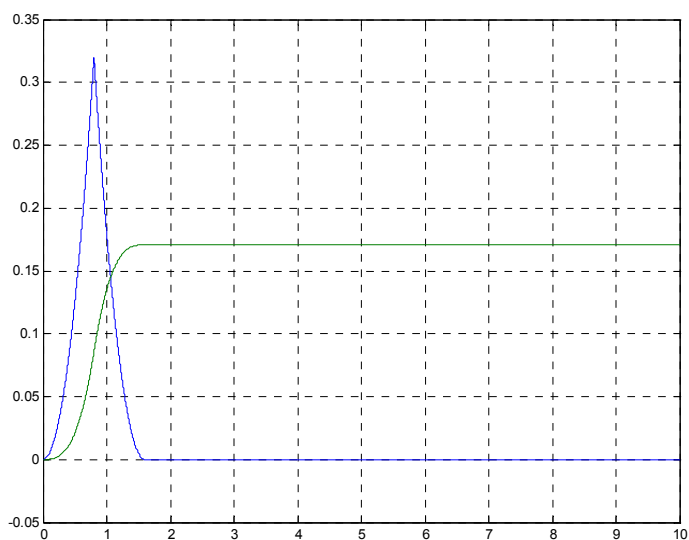
За одређивање положаја кабине лифта, а што је врло битно за његово функционисање, можемо искористити дати модел имплементирајући у његовој структури једначину (2.2). Дијаграми коју показују промјену положаја у три карактеристична случаја, заједно са промјеном брзине, приказани су на сликама 3.7, 3.8 и 3.9.



Слика 3.7 – Положај и брзина

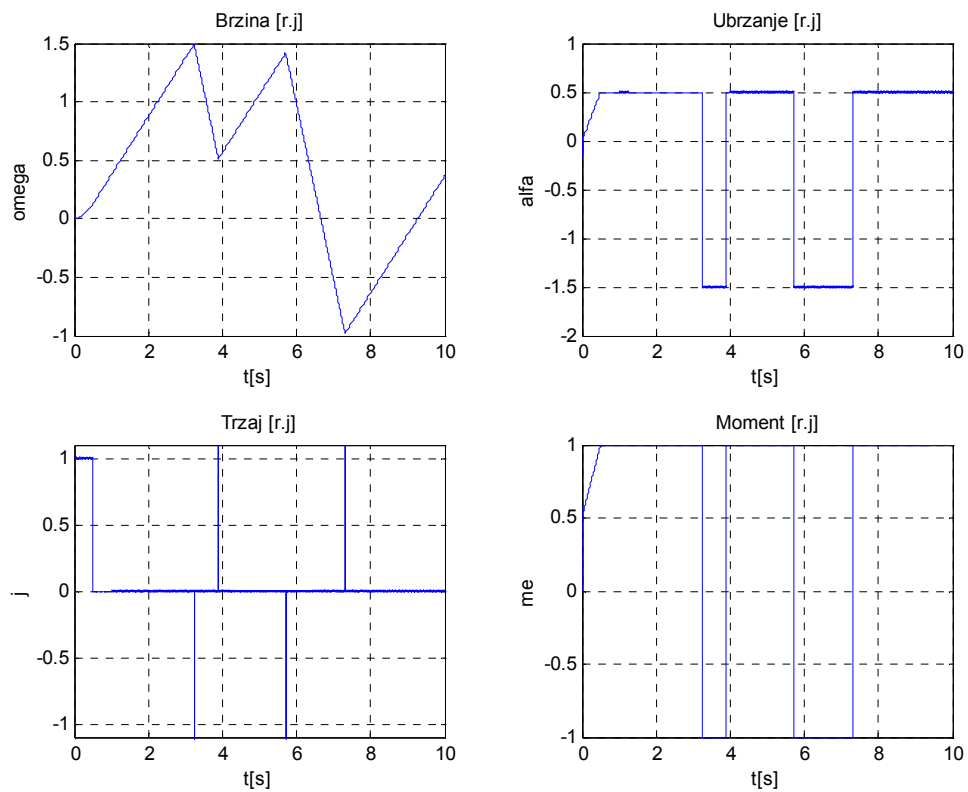


Слика 3.8 – Положај и брзина



Слика 3.9 – Положај и брзина

Иза анализирајмо још случај да потребни електрични момент прелази дозвољене вриједности услед преоптерећења. За потребе симулације, у ту сврху, додаћемо лимитер момента у границама од -1 до +1, а да при томе не правимо измјене у остатку модела. Резултати су на слици 3.10.



Слика 3.10 – Резултати симулације модела са уграђеним лимитером

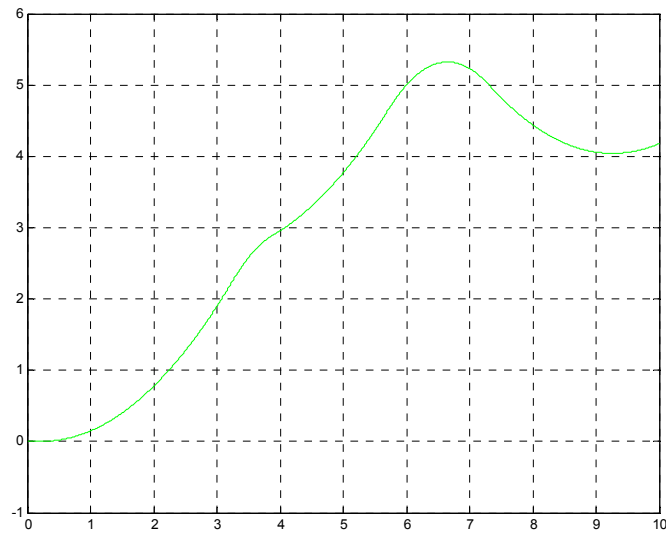
Приказани дијаграми упућују на закључак да при преоптерећењу настаје приличан хаос.

Посматрајмо графике упоредно. Систем се добро понаша док не реагује лимитер. У том тренутку брзина почиње да расте линеарно са временом (константним убрзањем) и то до вриједности која је за 50% већа од номиналне. После долази до осциловања, како брзине, тако и момента који "скаче" са једне на другу граничну вриједност дефинисану лимитером. При томе је, осим у почетном периоду у коме не реагује лимитер, трзај једнак нули.

Када се успостави захтјев за кочењем не долази до успоравања, које треба да резултује заустављањем, већ напротив до промјене смјера кретања које достиже чак номиналну брзину. Ова појава се директно одражава, и то врло неповољно, на положај кабине. То се најбоље види на слици 3.11 – кабина се не зауставља на станици већ се враћа уназад!

Основни кривац за овакав сценарио је уграђени лимитер и ограничење момента. Када ограничавач реагује то се манифестује као неутралисање регулатора брзине и јављају се неповољне осцилације. Рјешење проблема је у некориштењу лимитера јер за њим и нема потребе. Ако посматрамо формулу (3.21) видимо да максимални електрични момент можемо држати у дозвољеним границама избором одговарајуће вриједности максималног трзаја уз истовремено поштовање прописаног оптерећења (максималне носивости). Ако би се ипак у кабини лифта нашао терет веће тежине од максималне прописане носивости реаговаће заштите на преоптеретљивост које су имплементирани у лифтовском

постројењу јер преоптерећење тог типа не угрожава само погонску машину и сигурност већ и цјелокупан механички подсистем.



Слика 3.11 – Положај код модела са уграђеним лимитером

4. ЗАКЉУЧАК

Кроз овај рад изанализирали смо могућност одржавања трзаја, при поласку и заустављању кабине лифта, на заданој вриједности по апсолутном износу. Извели смо математички модел који описује кретање лифта које омогућава директан утицај на вриједност трзаја. Добијени резултати, који су приказани и анализирани, потврђују прије свега, исправност математичког модела.

Резултати показују да је задавањем референтне брзине одређеног облика векторски управљаном асинхроном мотору могуће добити благ и за путнике пријатан полазак кабине уз мирну вожњу и при великим номиналним брзинама. При томе нема великих оптерећења на механички подсистем, а прије свега на ужницу и ужад код којих се смањује могућност проклизавања чиме се продужава њихов радни вијек.

За све случајеве стартовања и заустављања који могу да се појаве у пракси вриједност трзаја задржала је задану константну вриједност што је врло важан резултат.

Анализа пређеног пута пружа нове могућности када је у питању одређивање тренутка заустављања (у тексту тренутак t_k) код лифтовског постројења (векторски управљаног). Могуће је програмско одређивање дијаграма кретања и процјене положаја кабине које може да се имплементира у управљачкој структури лифта.

Овакав начин управљања лифтом, као што смо већ напоменули, подразумјева употребу векторски управљаног асинхроног мотора који има бројне предности у односу на друге електричне машине које су кориштене у лифтовским погонима. С њим добијамо још неке важне предности: брзина не зависи од оптерећења, немамо енормно велике полазне струје (као нпр. код асинхроних двобрзинских мотора директно прикључених на мрежу) и можемо искористити алгоритме за увећање ефикасности погона [3].

У савременим лифтовским постројењима врло често користе се синхрони мотори са перманентним магнетима. Иако је овај рад писан за погон са асинхроним мотором све речено о појави трзаја, његовој математичкој представи као и могућности његове контроле вриједи и за погоне са фреквентно управљаним синхроним моторима. Ови погони (а посебно безредукторски) у комбинацији са проблематиком која је обрађена у овом раду могу представљати добру основу за будући рад.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бранко Шелендић, *Вертикални, коси и хоризонтални транспорт*. Грађевинска књига, Београд, 1982.
- [2] Владан Вучковић, *Електрични погони*. Електротехнички факултет, Београд, 1997.
- [3] Слободан Н. Вукосавић, *Дигитално управљање електричним погонима*. Академска мисао, Београд, 2003.

6. ПРИЛОГ

6.1 C-функција (bk_sf.m)

```
function [sys,x0,str,ts] = bksf(t,x,u,flag)
%=====
%Glavni program:
%
switch flag,
%
%Inicijalizacija:
%
    case 0,
        [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
%
%Odredjivanje izlaza:
%
    case 3,
        sys=mdlOutputs(t,x,u);
%
%Nekoristene vrijednosti promjenljive flag:
%
    case {1,2,4,9}
        sys=[];
%
%Neocekivani flagovi:
%
    otherwise
        error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);

end

%Kraj glavnog programa.
%=====
%Potprogram za inicijalizaciju:
%
function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes

sizes = simsizes;

sizes.NumContStates      = 0;    %nema kontinualnih promjenljivih stanja
```

```

sizes.NumDiscStates      = 0;  %nema diskretnih promjenljivih stanja
sizes.NumOutputs         = 1;  %broj izlaza
sizes.NumInputs          = 3;  %broj ulaza
sizes.DirFeedthrough     = 8;  %broj direktnih veza ulaza i izlaza
sizes.NumSampleTimes     = 1;  %at least one sample time is needed

```

```

sys = simsizes(sizes);
%
%nema promjenljivih stanja:
x0 = [];
%
%str je uvijek prazna matrica:
str = [];
%
%inicijalizacija matrice vremena semplovanja:
ts = [-1 0];

```

```

%Kraj potprograma za inicijalizaciju

```

```

%=====

```

```

%Potprogram za odredjivanje izlaza

```

```

%gdje su:

```

```

%u(1)=t

```

```

%u(2)=c

```

```

%u(3)=tk

```

```

%

```

```

function sys=mdlOutputs(t,x,u)

```

```

%generisanje krive 1:

```

```

if u(1)>=0 & u(1)<1/sqrt(u(2)) & u(1)<u(3)

```

```

    sys=u(2)/2*u(1)^2;

```

```

%generisanje krive 2:

```

```

elseif u(1)>=1/sqrt(u(2)) & u(1)<2/sqrt(u(2)) & u(1)<u(3)

```

```

    sys=-u(2)/2*u(1)^2+2*sqrt(u(2))*u(1)-1;

```

```

%generisanje prave 3-nominalna brzina:

```

```

elseif u(1)>=2/sqrt(u(2)) & u(1)<u(3)

```

```

    sys=1;

```

```

%generisanje krive 4 kada ona pocinje na pravoj 3, kriva 4b:

```

```

elseif u(1)>=u(3) & u(3)>2/sqrt(u(2)) & u(1)<u(3)+1/sqrt(u(2))

```

```

sys=-u(2)/2*u(1)^2+u(2)*u(3)*u(1)-u(2)/2*u(3)^2+1;

%generisanje krive 4 kada ona pocinje na krivoj 2, kriva 4a:
elseif u(1)>=u(3) & u(3)>1/sqrt(u(2)) & u(3)<=2/sqrt(u(2)) & u(1)<2*u(3)-
1/sqrt(u(2))
    sys=-u(2)/2*u(1)^2+(2*u(2)*u(3)-2*sqrt(u(2)))*u(1)+4*sqrt(u(2))*u(3)-
2*u(2)*u(3)^2-1;

%generisanje krive 5 kada ona pocinje na krivoj 1 ili na krivoj 4a, respektivno,
kriva 5a:
elseif (u(1)>=u(3) & u(3)<=1/sqrt(u(2)) & u(1)<=2*u(3)) | (u(3)>1/sqrt(u(2))
& u(3)<=2/sqrt(u(2)) & u(1)>=2*u(3)-1/sqrt(u(2)) & u(1)>=u(3) &
u(1)<=2*u(3))
    sys=u(2)/2*u(1)^2-2*u(2)*u(3)*u(1)+2*u(2)*u(3)^2;

%generisanje krive 5 kada ona pocinje na krivoj 4b, kriva 5b:
elseif u(3)>2/sqrt(u(2)) & u(1)>=u(3)+1/sqrt(u(2)) & u(1)<=u(3)+2/sqrt(u(2))
    sys=u(2)/2*u(1)^2-
(u(2)*u(3)+2*sqrt(u(2)))*u(1)+u(2)/2*u(3)^2+2*sqrt(u(2))*u(3)+2;

%lift se zaustavlja, referentna brzina je nula:
else sys=0;

end
%Kraj potprograma za odredjivanje izlaza.
%=====

```

6.2 Скрипт програма (bk_skript.m)

```

%Skript koji upisuje parametre u radni prostor,
%pokrece simulaciju u Simulinku i prikazuje
%graficki rezultate.
%=====
%=====
%Parametri motora i regulatora su (u relativnim jedinicama):
%
%radna (nominalna) brzina:
wn=1;
%moment opterecenja:
mopt=-0.5;
%induktivnosti motora:
m=1.5;

```

```

lr=0.1;
%otpornosti:
rs=0.07;
rr=0.05;
%mehanicka vremenska konstanta:
tm=2;
%struja po d-osi pri kojoj se ima nominalni fluks:
ids=0.7;
%me=km*iqs gdje je km:
km=(m^2/(m+lr))*ids;
%Parametri PI regulatora:
%vremenska konstanta integratora:
tw=0.002;
%faktor prigusenja (zeta):
z=1.2;
%proporcionalno pojacanje regulatora:
kw=(4*tm*z^2)/(tw*km);
%=====
%=====
%Pokretanje simulacije:
%
sim('bk_model')
%=====
%=====
%Graficko prikazivanje izlaznih velicina programa bk_model.mdl
%
subplot(2,2,1)
plot(t,w,'b',t,s)
title('Brzina i polozej [r.j]')
xlabel('t[s]')
ylabel('omega, theta')
grid
subplot(2,2,2)
plot(t,ubr,'g')
title('Ubrzanje [r.j]')
xlabel('t[s]')
ylabel('alfa')
grid
subplot(2,2,3)
plot(t,trz,'r')
axis([0 10 -1 1.1])

```



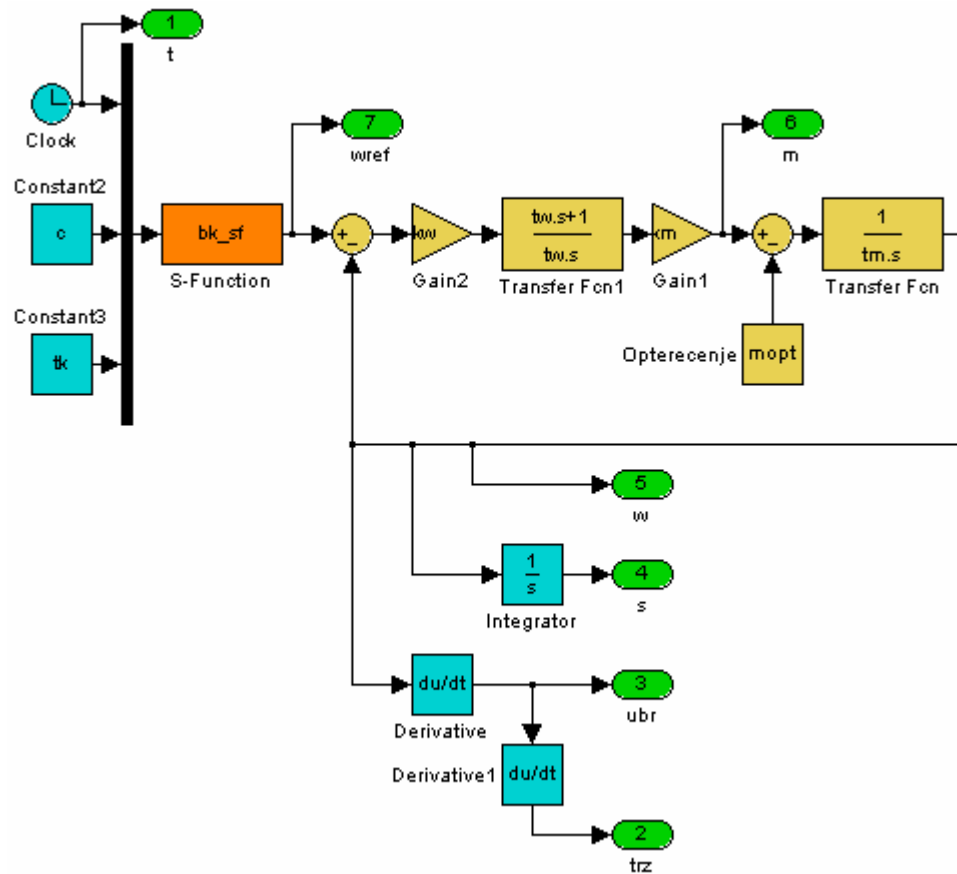
```

title('Trzaj [r.j]')
xlabel('t[s]')
ylabel('j')
grid
subplot(2,2,4)
plot(t,m,'b')
title('Moment [r.j]')
xlabel('t[s]')
ylabel('me')
grid
%=====
%=====

```

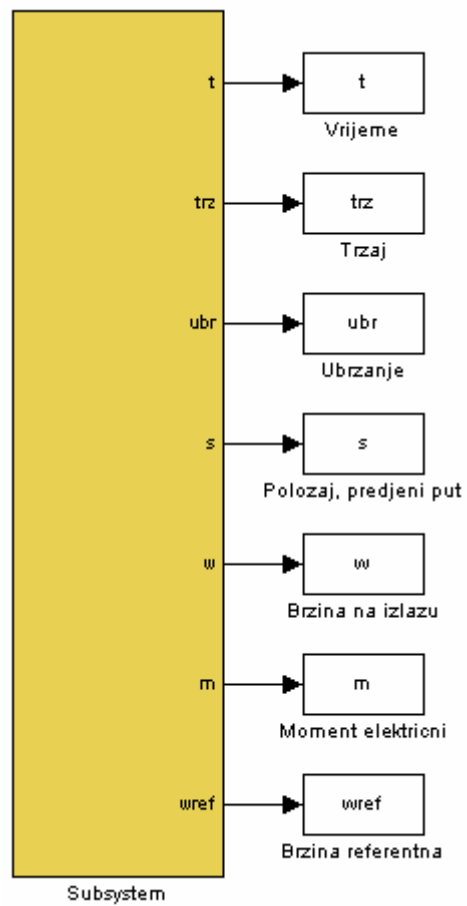
6.3 Симулинк модел (bk_model.mdl)

6.3.1 bk_model/Subsystem.mdl



Слика 6.1 – Simulink model

6.3.2 bk_model.mdl



Слика 6.2 – Simulink model(model)