

МОДЕЛИРАНЕ НА ПРЕВКЛЮЧВАНЕТО НА МОЩНОСТЕН ПРЕВКЛЮЧВАТЕЛ С ВАКУУМНИ ДЪГОГАСИТЕЛНИ КАМЕРИ

Николай Гуров

Резюме: Работа е посветена на съставянето на модел на процеса на превключване на мощностен превключвател, който е основна част на стъпалните регулатори на напрежение и осъществява превключването регулиращо напрежението. Изведен е математически модел на конкретен мощностен превключвател с две вакуумни дъгогасителни камери. Разработен е симулационен модел в Simulink, който дава възможност за изследване на влиянието на конструктивните и експлоатационни параметри на процеса на превключване в лабораторни условия и може да подпомогне оптимизирането и повишаването на надеждността на конструкцията на изделието.

Ключови думи: Стъпален регулатор, Мощностен превключвател, Математически модел, Simulink, MATLAB;

MODELING OF THE SWITCHING PROCESS OF A DIVERTER SWITCH WITH VACUUM INTERRUPTERS

Nikolay Gourov

Abstract: The paper is devoted to compiling the model of the switching process of a diverter switch, which is a major part of on-load tap-changers and implements switching process which actually regulates the voltage. Mathematical model of a particular diverter switch with two vacuum interrupters was achieved. A simulation model in Simulink has been developed. It allows studying the influence of the structural and operating parameters on the switching process in the laboratory and can help optimize and improve the reliability of the construction of the product.

Keywords: On-Load Tap-Changer, Diverter Switch, Mathematical model, Simulink, MATLAB

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Осигуряването на качеството на електрическата енергия е една от основните задачи на енергетиката. От него зависи както правилната и безаварийна работа на включените в електрическата мрежа уреди, така и живота и здравето на персонала поддържащ мрежата, а и на всички потребители. Номиналното напрежение е един от най-важните параметри на качеството на електрическата енергия. Регулирането под товар на напрежението чрез вградени в трансформаторите стъпални регулатори е най-разпространеният метод в енергетиката и промишлеността. Основни съставни части на стъпалните регулатори, които всъщност

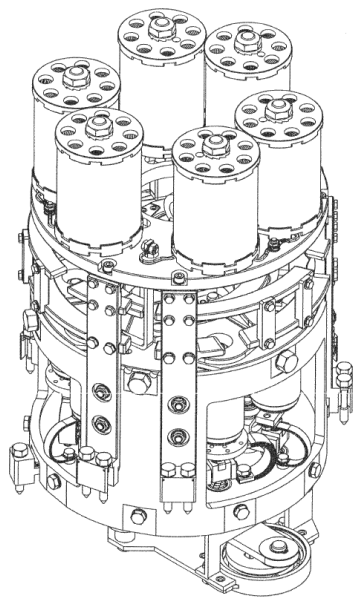
осъществяват превключването на отклоненията, което от своя страна регулира напрежението, са мощностните превключватели.

Превключването на мощностните превключватели на стъпалните регулатори обикновено се извършва много бързо, което води до развитието на големи динамични усилия и появата на удари и вибрации. Настройката на режима на превключване в практиката нормално се извършва като се използва натрупания опит и прилагайки метода „проба-грешка”. При разработката на нови мощностни превключватели активно се използват специализирани програмни пакети като AutoCAD и ANSYS.

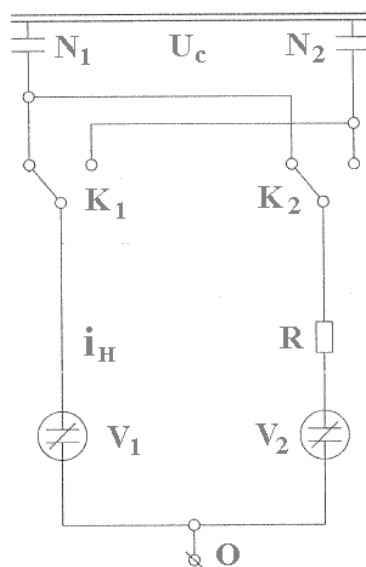
Цел на настоящето изследване е да се разработи математически модел на нов мощностен превключвател на стъпален регулатор на напрежение с две вакуумни дъгогасителни камери. Моделът е симулиран с помощта на Simulink – средата на MATLAB [1] за моделиране и симулиране на динамични системи и с негова помощ може да се изучи влиянието на различни конструктивни и експлоатационни параметри при превключване, което от своя страна е важно за разработчиците, конструкторите и изпитателите на стъпални регулатори на напрежение.

2. КОНСТРУКЦИЯ НА МОЩНОСТНИЯ ПРЕВКЛЮЧВАТЕЛ

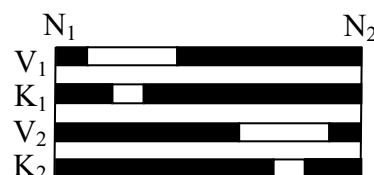
Общ вид на изследвания мощностен превключвател (МП) е показан на фиг.1. Електрическата схема на превключване на една фаза на МП с две вакуумни дъгогасителни камери (ВДК) може да се види на фиг.2.а). Главната ВДК V_1 е свързана към текущото отклонение N_1 на стъпалната намотка U_c чрез бързодействащия разединител K_1 . Превключвател K_2 включва свързаните последователно спомагателна ВДК V_2 и резистор R към затворената главна ВДК. Последователността на действие на отделните комутиращи елементи може да се проследи на идеализираната циклограма от фиг.2.б).



Фиг.1. Общ вид на мощностен превключвател.



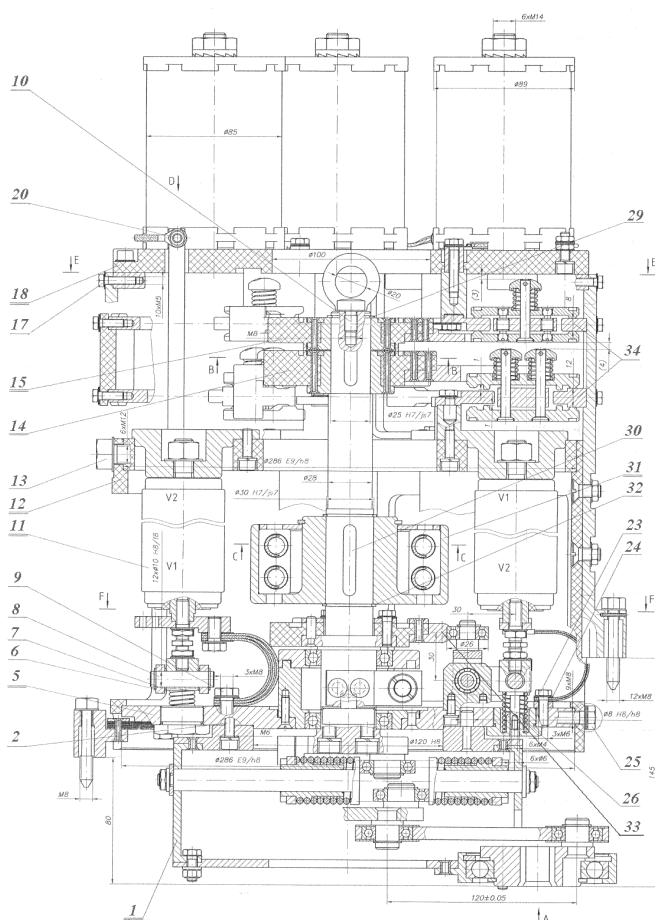
а)



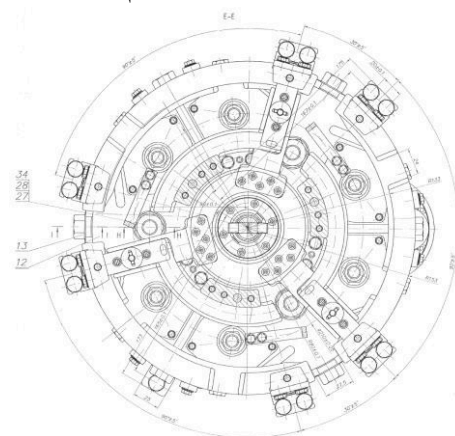
б)

Фиг.2.а) Електрическа схема на МП; **б)** Идеализирана циклограма на процеса на превключване .

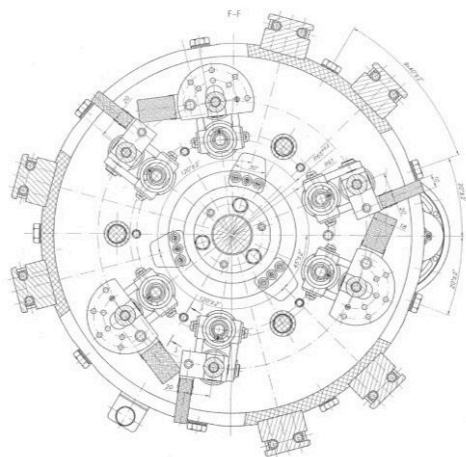
На фиг.3 е показана конструкцията на изследвания мощностен превключвател. Всички изследвания в работата са направени за него. Трите фази на трифазния МП са унифицирани с тези на еднофазния, което позволява получените резултати да се умножават по три. С цифри са означени важни елементи на конструкцията. Носещият корпус на МП е съставен от изолационен цилиндър 12, метално дъно 5 и изолационна плоча 13. Централният задвижващ вал 30 е лагериран към дъното 5 и е свързан с пружинния енергиен акумулатор (ПЕА) 1. На вала 30 са разположени гърбиците 33 за задействане на механизмите 8 на ВДК и изолационните дискове 14 и 15 за задействане на бързодействащите разединители K_1 и K_2 . Неподвижните тоководещи дъги 34 са монтирани отвън на изолационния цилиндър 12. На вала 30 е монтиран и приплъзващ маховик 31.



а)



б)



в)

Фиг.3. Конструкция на изследвания мощностен превключвател; а) Надлъжен разрез; б) Напречен разрез над контактите; в) Напречен разрез над гърбиците.

3. АНАЛИТИЧНО ОПИСАНИЕ НА ДВИЖЕНИЕТО

Действието на МП се описва от връзката между ъгъла на завъртане α на задвижващия вал и обуславящите го силови моменти. В основата на описанието стои теоремата за изменението на кинетичната енергия, която гласи, че извършената работа от сила „F” действаща на тяло с маса „m” е равна на промяната на кинетичната енергия на тялото и може да се запише в диференциална форма във вида [2]:

$$dW = dE_k \quad (1)$$

където W е извършената работа, а E_k - кинетичната енергия.

Като се има предвид, че за въртливо движение е в сила $dW = M d\alpha$ и $E_k = \frac{1}{2} I \omega^2$, където M е приведения силов момент действащ на тялото, α – ъгълът на завъртане, I – приведеният сумарен инерционен момент на тялото, ω – ъгловата скорост на тялото, уравнението добива вида:

$$M d\alpha = d\left(\frac{1}{2} I \omega^2\right) = I \omega d\omega + \frac{\omega^2}{2} dI \quad (2)$$

Тъй като $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$, следва че $M = I \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dI}{d\alpha} = I \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dI}{d\alpha}$. Приведеният силов момент M се получава от едновременното действие на двигателния и съпротивителния моменти, т.е. $M = M_d - M_c$. Следователно диференциалното уравнение, което описва движението на въртящия се вал може да се опише с израза:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_c - \frac{\omega}{2} \frac{dI}{d\alpha} \quad (3)$$

За да се получи окончателната форма на диференциалното уравнение трябва да се вземе под внимание, че съпротивителният момент е съставен от следните основни силови моменти: 1) Съпротивителен момент от триене в контактите – $M_{трк}$, 2) Съпротивителен момент от включване и изключване на вакуумните дъгогасителни камери – $M_{вдк}$, 3) Съпротивителен момент от механично триене в механизмите на мощностния превключвател – $M_{трм}$, 4) Съпротивителен момент от хидравлично триене – M_x (Обикновено M_x се изразява с формулата: $M_x = S \omega^2 = S \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)^2$, където S е коефициент), 5) Съпротивителен момент на буфера – $M_{сб}$.

Така се получава окончателната форма на диференциалното уравнение, което описва движението на задвижващия вал:

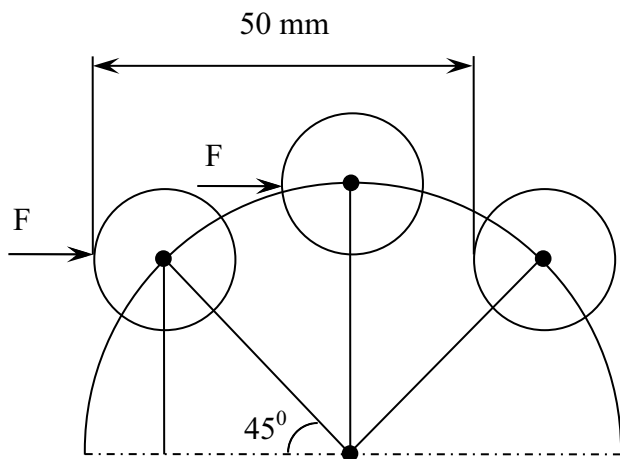
$$I \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_{мпк} - M_{вдк} - M_{мпм} - M_{сб} - S \omega^2 - \frac{\omega}{2} \frac{dI}{d\alpha} \text{ или } I \frac{d^2\alpha}{dt^2} = M_d(\alpha) - M_{мпк}(\alpha) - M_{вдк}(\alpha) - M_{мпм}(\alpha) - M_{сб}(\alpha) - S \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)^2 - \frac{1}{2} \frac{d\alpha}{dt} \frac{dI}{d\alpha} \quad (4)$$

4. МОДЕЛИРАНЕ НА ПРОЦЕСА НА ПРЕВКЛЮЧВАНЕ

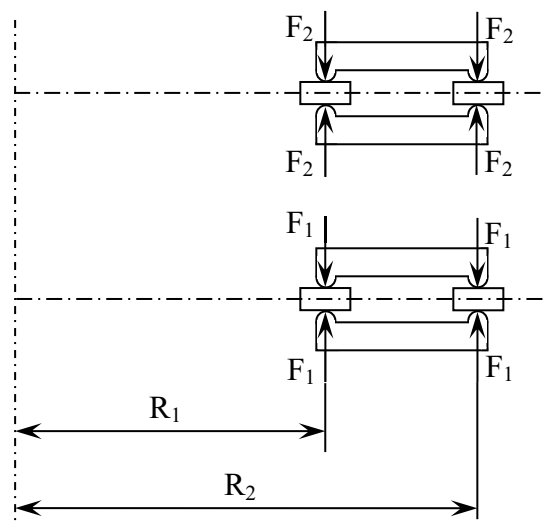
Превключването между отклоненията на МП се осъществява чрез завъртането на централния вал (30 от фиг. 3) на 90° , като в едната посока се реализира превключване от N_1 към N_2 , а в обратната посока от N_2 към N_1 (фиг.2.б)).

Двигателният момент $M_d(\alpha)$ се получава от действието на пружинно енергийния акумулатор (1 от фиг.3). При него пружините се натягат предварително до някаква сила F_0 и в необходимия момент се освобождават, с което се стартира процеса на превключване. При завъртането силата се променя линейно в зависимост от ъгъл α по закона $F(\alpha) = F_0 - \frac{F_0}{180} \alpha$. Рамото на силата се променя в съответствие с фиг.4 и може да бъде изчислено по формулата $R(\alpha) = \frac{0,05}{\sqrt{2}} \sin(45 + \alpha)$. Следователно резултатният силов момент е:

$$M_d(\alpha) = F(\alpha) \cdot R(\alpha) = \left(F_0 - \frac{F_0}{180} \cdot \alpha\right) \cdot \left(\frac{0,05}{\sqrt{2}} \cdot \sin\left(\frac{(45+\alpha) \cdot 2\pi}{360}\right)\right) \quad (5)$$



Фиг.4. Геометрия на превключването.



Фиг. 5. Контактване на подвижните и неподвижните контакти.

Съпротивителният момент от триене в контактите $M_{\text{трк}}(\alpha)$ се дължи на триенето между подвижните и неподвижните контакти при завъртането на централния вал. Обуславя се от действието на осем пружини (четири пружини на всеки контакт по две за всяка шина) (фиг.5). Конкретните параметри са:

$R_1=80 \text{ mm}$ – радиус на първата шина;

$R_2=140 \text{ mm}$ – радиус на втората шина;

$F_1=80 \text{ N}$ – сила на първата четворка пружини (две по две);

$F_2=40 \text{ N}$ – сила на втората четворка пружини (две по две);

$f=0,1$ – коефициент на триене.

За тези параметри моментите от съответните сили се получават:

$$M_1=2.F_1.R_1.f+2.F_1.R_2.f=3,52 \text{ Nm} \quad (6)$$

$$M_2=2.F_2.R_1.f+2.F_2.R_2.f=1,76 \text{ Nm} \quad (7)$$

Общият момент от триене на контактите за трите фази ще бъде:

$$M_{\text{трк}}=(M_1+M_2).3=15,84 \text{ Nm} \quad (8)$$

От 18° до 27° изключва първия контакт, т.е. $M_1=2.F_1.R_1.f=1,28 \text{ Nm}$

$$M_{\text{трк}}=(M_1+M_2).3=9,12 \text{ Nm} \quad (9)$$

От 63° до 72° изключва втория контакт, т.е. $M_2=2.F_2.R_1.f=0,64 \text{ Nm}$

$$M_{\text{трк}}=(M_1+M_2).3=12,48 \text{ Nm} \quad (10)$$

Съпротивителния момент от действието на вакуумните дъгогасителни камери $M_{\text{вдк}}$ се дължи на включването и изключването на V_1 и V_2 .

Първото превключване започва на 9° и продължава до 36° . През този период силата се променя линейно от $F_3=200 \text{ N}$ до $F_3=-200 \text{ N}$, Радиусът на завъртане е $R_3=40 \text{ mm}$.

Второто превключване започва от 54° и продължава до 81° . Превключването протича по същия начин, т.е. F_3 се променя линейно за този период от 200 N до -200 N и радиусът на завъртане е $R_3=40 \text{ mm}$.

В крайна сметка се получават следните зависимости за различните ъгли на завъртане:

За $\alpha=0^{\circ}\div 9^{\circ}$, $\alpha=36^{\circ}\div 54^{\circ}$ и $\alpha=81^{\circ}\div 90^{\circ}$ вакуумните дъгогасителни камери не участват в превключването, т.е. $F_3(\alpha)=0$.

За интервала от 9° до 36° се осъществява първото превключване и $F_3(\alpha)$ действа по следния начин:

$$F_3(\alpha) = A - B\alpha = \frac{1000}{3} - \frac{400}{27}\alpha \quad (11)$$

За интервала от 54° до 81° е в сила второто превключване и силата се променя по закона:

$$F_3(\alpha) = A - B\alpha = 1000 - \frac{400}{27}\alpha \quad (12)$$

За силовият момент се получава $M_{ВДК}=F_3(\alpha).0,04 \text{ Nm}$. Сумарно за трите фази

$$M_{ВДК}=F_3(\alpha).0,04.3 \text{ Nm}. \quad (13)$$

Съпротивителният момент от механично триене в механизмите на мощностния превключвател $M_{трМ}$ и съпротивителният момент от хидравлично триене M_x нормално се състоят от много и най-различни моменти затова с цел опростяване на модела се вземат по 5% от максималния момент от триене на контактите за целия период на завъртане ($0^{\circ}\div 90^{\circ}$), т.е.

$$M_{трМ}(\alpha)+M_x(\alpha)=1,584 \text{ Nm}. \quad (14)$$

Съпротивителният момент на буфера $M_{сб}$ се проявява в края на превключването и спомага за избягване на механични удари и вибрации при завършването на процеса. Той се осъществява от две пружини разположени на двете шини. Силата $F_4(\alpha)$ на пружините се променя линейно от 0 до 300 N за завъртане от 86° до 90° . Следователно:

$$F_4(\alpha) = \frac{300}{4}(\alpha - 86) = 75\alpha - 6450 \text{ N}. \quad (15)$$

За момента се получава:

$$M_{сб} = F_4(\alpha)0,08 + F_4(\alpha)0,14 = F_4(\alpha).0,22 = 16,5\alpha - 1419 \text{ Nm} \quad (16)$$

Сумарният приведен инерционен момент I е сума от приведените инерционни моменти на всички механизми участващи в превключването, но основно влияние има инерционният момент на маховика. За опростяване на модела в началото ще бъде отчетен само инерционният момент на маховика и ще бъде прието, че той е постоянен. Маховикът е изработен във вид на диск, т.е. $I = \frac{mr^2}{2}$, където m е масата на маховика, а r – радиусът на завъртане. Масата може да се изчисли от обема на маховика (V) и плътността му (ρ) по формулата $m=V.\rho=\pi.r^2.h.\rho$. Като се има предвид, че маховикът е изработен от стомана с радиус $r=60 \text{ mm}$ и дебелина $h=50 \text{ mm}$ (плътността на стоманата е $\rho=7800 \text{ kg/m}^3$), за масата се получава: $m=\pi.r^2.h.\rho=4,41\text{kg}$. Следователно инерционният момент е:

$$I = \frac{mr^2}{2} = \frac{4,41.0,06^2}{2} = 0,0079 \text{ kg.m}^2. \quad (17)$$

След направените изчисления и опростявания изразът описващ движението на задвижващият вал добива вида:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{M_d(\alpha)-M_{мпК}(\alpha)-M_{ВДК}(\alpha)-M_{сб}(\alpha)-M_{трМ}-M_x}{I} \quad (18)$$

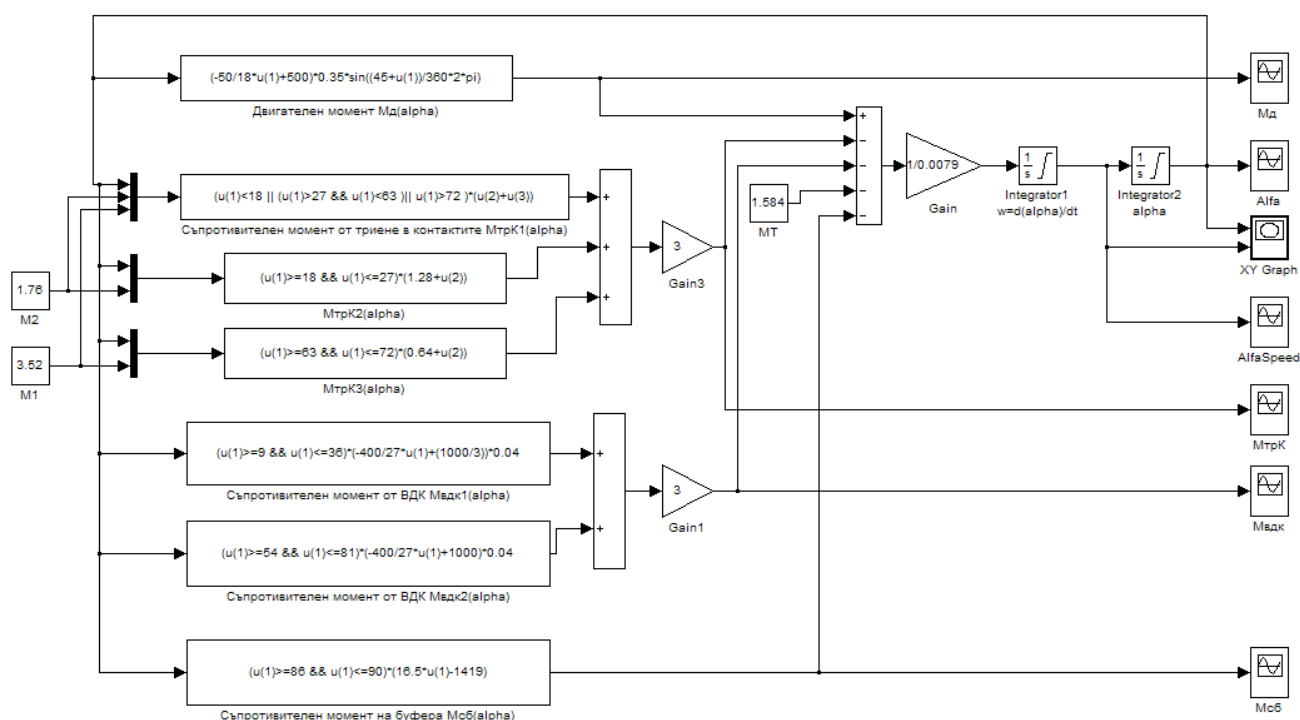
5. СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ

На база на (18) е разработен симулационен модел на превключването в програмна среда MATLAB с помощта на приложението й за моделиране Simulink [5].

Решението във времето се осъществява чрез двойно интегриране на (18):

$$\alpha = \alpha(0) + \iint \left(\frac{M_d(\alpha) - M_{\text{ТрК}}(\alpha) - M_{\text{ВДК}}(\alpha) - M_{\text{сб}}(\alpha) - M_{\text{ТрМ}} - M_x}{I} \right) dt \quad (19)$$

Избран е числен метод „Дорманд-Принс” при стъпка на дискретизация $\Delta t = 0,001$ s и време за симулация $t = 0,5$ s. На фиг.6 е представен моделът както изглежда в прозореца за редактиране на Simulink.



Фиг.6. Симулационен модел на процеса на превключване на мощностен превключвател.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работата е представено построяването на модел на процеса на превключване на мощностен превключвател с вакуумни дъгогасителни камери. Съставен е динамичен модел на превключването базиран на опростени зависимости между функционалните характеристики и геометричните параметри на избрания мощностен превключвател. На основата на този модел е разработен симулационен модел в средата за моделиране и симулиране на динамични системи Simulink на програмния пакет MATLAB. С помощта на полученият модел може да се провеждат симулационни изследвания на динамиката на превключването на мощностния превключвател, които да подпомогнат оптимизирането на процеса на превключване и повишаването на надеждността му. С малки изменения съобразени с конкретната конструкция моделът може да се адаптира и използва за изследване на динамиката и на други мощностни превключватели.

БЛАГОДАРНОСТ

Авторът изказва своята благодарност на Технически Университет - София за подкрепата, която оказва в работата му.

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ-София - 2015 год., договор 152ПД0032-08

ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://www.ma.utexas.edu/users/haack/getstart.pdf>
(посетен последно на 25.04.2016г.)
- [2] http://www.phy.duke.edu/~rgb/Class/intro_physics_1/intro_physics_1.pdf
(посетен последно на 25.04.2016 г.)
- [3] Т. Dragomirov and N. Gourov Transient Dynamic Responses During Switch Over Operation of Diverter Switch with Vacuum Interrupters, Proceedings of XVI – th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies “SIELA 2009”, 4 – 6 June 2009, Bourgas, Bulgaria, vol. 1, pp. 94-100
- [4] Сн. Йорданова и Пл. Цветков Приложно моделиране и симулиране на системи, Херон Прес ООД, София, 2001, ISBN 954-580-105-0
- [5] http://cn.mathworks.com/help/pdf_doc/simulink/sl_using.pdf
(посетен последно на 25.04.2016г.)

Автор: Николай Гуров, маг. инж. асистент, катедра „Електроизмервателна техника“, Факултет Автоматика, Технически Университет-София; E-mail address: nrg@tu-sofia.bg

Постъпила на 23.04.2016

Рецензент: проф. д-р П. Цветков