

**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ГАБРОВО
ФАКУЛТЕТ „ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И ЕЛЕКТРОНИКА“
КАТЕДРА „ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕ И
ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕ“**

маг. инж. Константинос Георгиос Каракулидис

**ПРЕХОДНИ ПРОЦЕСИ И ДИНАМИЧНИ НАТОВАРВАНИЯ
ПРИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ ЗА МЕХАНИЗМИ С
УДАРНО НАТОВАРВАНЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертационен труд за присъждане на образователна и научна
степен
„ДОКТОР“**

Област на висше образование 5. Технически науки
Направление: 5.2 „Електротехника, електроника и автоматика“
Специалност: „Електроснабдяване и електрообзавеждане“

Научен ръководител: доц. д-р инж. Свилен Радославов Рачев

Габрово, 2015

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от разширен катедрен научен съвет на катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане" при Технически университет – Габрово на 15.10.2015 г.

Изследванията по дисертационния труд са извършени в катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане" при Технически университет – Габрово.

Дисертационният труд съдържа 4 глави, изложени на 182 страници, в които са включени формули, 47 фигури и графики, 17 таблици и 3 приложения. Списъкът на литературните източници е съставен от 157 заглавия, от които 75 на кирилица, 72 на английски език и 10 източника в Internet.

Номерацията, присвоена на фигурите и таблиците в автореферата, е същата, както в дисертационния труд.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 10.12.2015 г. 13:00 часа, зала 2603 на Технически университет – Габрово.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане" при Технически университет – Габрово.

Благодарности: Изказвам дълбокото си уважение и благодарност към научния си ръководител доц. д-р инж. Свилен Радославов Рачев за подкрепата и съдействието при разработката на дисертационния труд.

Автор: Константинос Георгиос Каракулидис

Заглавие: Преходни процеси и динамични натоварвания при електрически машини за механизми с ударно натоварване

Тираж: 20 бр.

А. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на темата

Най-голям дял от консумираната в света електрическа енергия заемат електрическите двигатели – около 60÷65% от нея според преобладаващи оценки. Същевременно най-често използвани са асинхронните електродвигатели.

Асинхронните двигатели са може би най-масовите и най-добре прилагани двигатели, налични в момента. Променливотоковите асинхронни двигатели се смятат за универсалната машина на производствената индустрия. Изчислено е, че те се използват в 70-80 на сто от всички индустриални задвижващи приложения. Сред основните предимства на асинхронните двигатели са проста и здрава конструкция, тяхната лесна поддръжка, както и тяхната икономичност на работа.

При това за електрозадвижването на различните механизми в индустрията и бита широко разпространени са асинхронните електродвигатели с накъсосъединен ротор.

Работата на асинхронната машина се основава на електромагнитното взаимодействие между възбуденото от тока на многофазна първична намотка въртящо магнитно поле и индуктираните от него токове във вторичната намотка.

Работата на асинхронните електродвигатели е съпроводена с преходни процеси, като по време на тях те развиват значителни по големина електромагнитни моменти, няколко пъти превишаващи номиналния, пусковия и дори критическия (максималния) момент. Тези моменти са причина за възникване на опасни механични напрежения в елементите на кинематичната верига на електромеханичната система. Те не могат да се пренебрегват на етапите на проектирането и конструирането и при оценка на надеждността на работа на електрозадвижването.

При провеждане на изследвания много често графиките на преходните процеси в асинхронното електрозадвижване се построяват по статичните механични характеристики без отчитане на електромеханичните преходни процеси. Пренебрегването на тяхното влияние води до големи грешки при изчисленията.

Детайлното изучаване на електромагнитните и електромеханичните преходни процеси дава възможност по-рационално да се изчислят и конструират както асинхронните машини, така и механичната част на електромеханичните системи.

Дисертационният труд е посветен на изследване на преходните процеси и динамичните натоварвания при асинхронни машини за механизми с ударно натоварване.

Цел и задачи на дисертационния труд

Цел на дисертационния труд е разработка и анализ на инженерни методи, модели, алгоритми и методики за изследване на електромеханичните

преходни процеси и динамични натоварвания при асинхронни машини за машини с ударни натоварвания. За постигане на тази цел трябва да се решат широк кръг задачи. Главните от тях са:

- Да се разработят математични модели на асинхронната машина, на механизмите и на електромеханичните системи с ударни натоварвания;
- Да се разработят алгоритми и избере подходящ софтуер за решаване на системите диференциални уравнения, описващи електромеханичните преходни процеси при различни машини с ударни натоварвания;
- Да се разработят алгоритми и модели за изследване на динамичните натоварвания при различни преходни процеси на механизми с ударни натоварвания;
- Да се изследват влиянията на параметрите на електрозадвижването и асинхронната машина върху протичането на преходните процеси при различни машини с ударни натоварвания.

Методи на изследването

Основните методи на работа, използвани при решаването на поставените задачи в дисертационния труд са: теоретичен анализ и изследвания с имитационно моделиране с приложение на числени методи.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд съдържа 4 глави, изложени на 182 страници, в които са включени формули, 47 фигури и графики, 17 таблици и 3 приложения. Списъкът на литературните източници е съставен от 157 заглавия, от които 75 на кирилица, 72 на английски език и 10 източника в Internet.

Б. КРАТКО ИЗЛОЖЕНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

В Глава 1 „Анализ на състоянието на проблема. Формулиране на целта и задачите” е направено проучване на изследванията на електромеханичните преходни процеси и динамични натоварвания при асинхронни машини, провеждани в България и в чужбина. От извършения аналитичен обзор на постиженията по темата на дисертационния труд могат да се направят следните изводи:

- Съществуват модели на асинхронната машина в различни координатни системи в абсолютни или относителни единици;
- Има разработени динамични модели на някои производствени машини;
- Не са известни разработени модели за определяне на динамичните натоварвания в машини с ударни натоварвания;

- При изследване на динамичните натоварвания често пъти се използва линейната част на статичната механична характеристика и по тази причина не могат да бъдат отчетени възникващите при електромеханичните преходни процеси ударни токове и моменти, продължителността на преходните процеси, динамичните натоварвания и ускоренията;
- Параметрите на асинхронните машини най-често се определят по изчислителна методика;
- Използва се различен софтуер за изследване на преходните процеси.

Глава 2 “Математични модели на електромеханичната система” има за цел представяне на разработени математически модели на асинхронната машина за различни координатни системи, на механичната част на електрозадвижването и на електромеханичната система. За асинхронната машина това е извършено с помощта на линейните преобразувания на уравненията на механичната характеристика на обобщената машина и на фазовите преобразувания на променливите. Описани са изчислителни схеми на механичната част, типове статични товари и уравненията на движението на електромеханичната система.

При анализа се приема система от означения, в която принадлежността на променливата към една или друга намотка се определя с индексите, с които са означени осите, свързани с намотките на обобщената машина и с показване дали се отнасят към статора или към ротора. Най-често се използват следните индекси:

- s , когато се отнася за статора;
- r , когато се отнася за ротора;
- α, β , когато се отнася за координатна система, твърдо свързана с неподвижния статор;
- d, q , когато се отнася за координатна система, свързана с ротора;
- u, v , когато се отнася за координатна система, въртяща се с произволна скорост спрямо статора;
- x, y , когато се отнася за координатна система, въртяща се със синхронна скорост спрямо статора.

Изтъкнати са предимствата от въвеждането на относителните единици при изследването на електрическите машини и е направен обоснован избор на система от базови величини, която се използва при изследванията. В практиката при избора и при проверката на електродвигателите по нагриване и по претоварване, а така също за оценка на техните пускови и претоварващи качества се използва номиналният момент на вала на електродвигателя. Затова при изследванията, за оценяване на горепосочените качества на електродвигателите и за евентуално сравнение помежду им, се използва номиналният момент като базов момент.

Представени са числените методи, използвани за математическо моделиране като две основни групи: методи с обособени стъпки на интегриране (едностъпкови методи) и методи със свързани стъпки на интегриране (многостъпкови методи). Направен е обосноваан избор на числен метод за решаване на диференциалните уравнения, въз основа на характерните качества на някои от отделните числени методи – при по-нататъшните изследвания е използвана съвременна модификация на метода на *Runge–Kutta*, вграден като функция в конкретен софтуер.

Представени са показателите на качеството на преходните процеси – максимално пререгулиране, продължителност на преходния процес, периодът на собствените колебания и др., а също и интегрални оценки на качеството на преходните процеси.

Изводи към Глава 2:

- Разработени са математически модели на асинхронна машина за различни координатни системи;
- Разработен е математически модел на механичната част на електромеханичната система;
- Направен е обосноваан избор на система от базови величини, която ще се използва при изследванията;
- Направен е обосноваан избор на числен метод за решаване на диференциалните уравнения, вграден като функция в конкретен изчислителен продукт;
- Избрани са показателите на качеството на преходните процеси.

Глава 3 “Преходни процеси и динамични натоварвания при асинхронни машини при ковашко-пресови машини. Синтезиране на симулационен модел за изследване на динамичното поведение на ковашко-пресови машини” има за цел изследвания с помощта на разработени математически модели на работата на ковашко-пресови машини.

Изследването на преходните процеси при асинхронната машина е извършено при общоприетите допускания.

Уравненията за напреженията на намотките на асинхронната машина са представени в координатна система “ x , y ”, въртяща се със синхронната ъглова скорост на въртящото се магнитно поле. Тази система от уравнения може да бъде представена в относителни единици, като се използва общоприетата система от базисни величини. Необходимо е участващите в уравненията пълни магнитни потоци да бъдат изразени посредством съответните токове с помощта на зависимостите между тях. С цел удобство при решаването, математическият модел се представя във форма на *Cauchy*. Използването на тази координатна система дава удобството, че в системата диференциални уравнения присъства важният параметър на асинхронната машина хлъзгането s .

След преобразувания, за уравненията на електрическото равновесие получаваме:

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{sx}^*}{d\tau} &= \frac{L_r^* L_m^*}{L_e^*} \left[\frac{u_{sx}^*}{L_m^*} - \frac{u_{rx}^*}{L_r^*} - \frac{r_s^*}{L_m^*} i_{sx}^* + \frac{r_r^*}{L_r^*} i_{rx}^* + i_{sy}^* \left(\frac{L_s^* L_r^* - s L_m^{*2}}{L_r^* L_m^*} \right) + (1-s) i_{ry}^* \right]; \\
 \frac{di_{sy}^*}{d\tau} &= \frac{L_r^* L_m^*}{L_e^*} \left[\frac{u_{sy}^*}{L_m^*} - \frac{u_{ry}^*}{L_r^*} - \frac{r_s^*}{L_m^*} i_{sy}^* + \frac{r_r^*}{L_r^*} i_{ry}^* + i_{sx}^* \left(\frac{s L_m^{*2} - L_s^* L_r^*}{L_r^* L_m^*} \right) - (1-s) i_{rx}^* \right]; \\
 \frac{di_{rx}^*}{d\tau} &= \frac{L_s^* L_m^*}{L_e^*} \left[-\frac{u_{sx}^*}{L_s^*} + \frac{u_{rx}^*}{L_m^*} + \frac{r_s^*}{L_s^*} i_{sx}^* - \frac{r_r^*}{L_m^*} i_{rx}^* + i_{ry}^* \left(\frac{s L_s^* L_r^* - L_m^{*2}}{L_s^* L_m^*} \right) - (1-s) i_{sy}^* \right]; \\
 \frac{di_{ry}^*}{d\tau} &= \frac{L_s^* L_m^*}{L_e^*} \left[-\frac{u_{sy}^*}{L_s^*} + \frac{u_{ry}^*}{L_m^*} + \frac{r_s^*}{L_s^*} i_{sy}^* - \frac{r_r^*}{L_m^*} i_{ry}^* + i_{rx}^* \left(\frac{L_m^{*2} - s L_s^* L_r^*}{L_s^* L_m^*} \right) + (1-s) i_{sx}^* \right].
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

За моментната стойност на електромагнитния момент на електродвигателя, при удовлетворяване на условията за инвариантност на мощността, се получава:

$$M^* = \frac{M}{M_N} = \frac{p L_b i_b^2 L_m^*}{M_N} (i_{sy}^* i_{rx}^* - i_{sx}^* i_{ry}^*) = \frac{p u_b i_b L_m^*}{M_N \omega_b} (i_{sy}^* i_{rx}^* - i_{sx}^* i_{ry}^*); \tag{3.5}$$

Фазните статорни напрежения в система относителни единици имат вида:

$$\begin{aligned}
 u_A^* &= k_U \cos(\tau + \varphi_0); \\
 u_B^* &= k_U \cos\left(\tau + \varphi_0 - \frac{2\pi}{3}\right); \\
 u_C^* &= k_U \cos\left(\tau + \varphi_0 + \frac{2\pi}{3}\right),
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

където: $k_U = \frac{U}{U_N}$ се отчита изменението на напрежението;

φ_0 – начална фаза на захранващото напрежение.

За съставлящите на изобразяващия вектор на статорните напрежения при удовлетворяване на условията за инвариантност на мощността се получава:

$$\begin{aligned}
 u_{sx}^* &= \sqrt{\frac{2}{3}} k_U \left[u_A^* \cos \tau + u_B^* \cos\left(\tau - \frac{2\pi}{3}\right) + u_C^* \cos\left(\tau + \frac{2\pi}{3}\right) \right]; \\
 u_{sy}^* &= -\sqrt{\frac{2}{3}} k_U \left[u_A^* \sin \tau + u_B^* \sin\left(\tau - \frac{2\pi}{3}\right) + u_C^* \sin\left(\tau + \frac{2\pi}{3}\right) \right].
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Тъй като електродвигателите са с късосъединен ротор, $u_{rx}^* = 0$ и $u_{ry}^* = 0$.

След заместване на (3.6) в (3.7) и преобразуване на получените тригонометрични зависимости, се доказва, че:

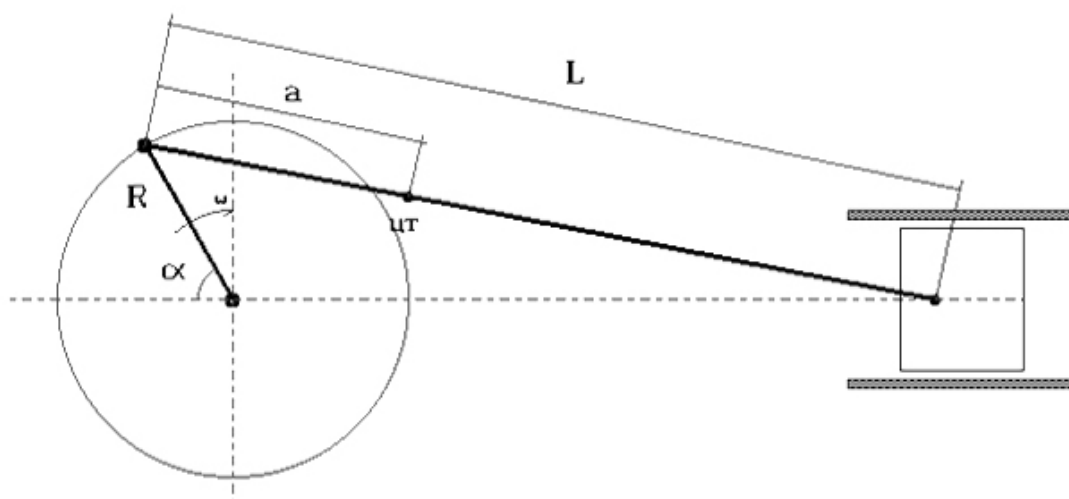
$$u_{sx}^* = \sqrt{\frac{2}{3}} \kappa_U \frac{3}{2} \cos \varphi_0 = \sqrt{\frac{3}{2}} \kappa_U \cos \varphi_0; \quad (3.8)$$

$$u_{sy}^* = -\sqrt{\frac{2}{3}} \kappa_U \left(-\frac{3}{2}\right) \sin \varphi_0 = \sqrt{\frac{3}{2}} \kappa_U \sin \varphi_0. \quad (3.9)$$

Според актуалната информация за производството на „ВАПТЕХ” АД и Schuler Group, по отношение на електрозадвижването, произвежданите от тях механични преси са в мощностния диапазон [2,2 – 130] kW. Предвид това, представените по-долу изследвания и резултати са за различни мощности на задвижващите електродвигатели.

Автоматизирано определяне на необходимата мощност и избор на електродвигатели за ковашко-пресови машини.

Чрез коляно-мотовилковия механизъм (фиг. 3.1), който е компонент от кинематичната верига, се получава възвратно-постъпателното движение, без да се реверсира електродвигателят. Но приведенят към вала на двигателя съпротивителен и инерционен момент зависят от ъгъла α на завъртане на колянния вал: $M_c = f(\alpha)$ и $J = f(\alpha)$. Това води до неравномерно (пулсиращо) натоварване на двигателя и значително усложнява избора му.



Фиг. 3.1. Коляно-мотовилков механизъм.

R – радиус на колянното; L – дължина на мотовилката; ЦТ – център на тежестта на мотовилката; a – разстояние до центъра на тежестта на мотовилката; ω – ъглова скорост на колянния вал; α – ъгъл на завъртане на колянния вал.

Блокова схема на алгоритъм за определяне на мощността и избор на електродвигател и оптимален инерционен момент на маховика на електрозадвижването на коляно-мотовилкови механизми с възвратно-постъпателно движение е представена на фиг. 3.2.

Съгласно показаната блок-схема, определянето на оптималните параметри на електрозадвижването става по метода на последователните приближения, като значението на отделните блокове е:

Блок 1. Избор на механизъм. От главното меню се избира механизъм с възвратно-постъпателно движение на работния орган. В този случай – ковашко-пресов механизъм.

Блок 2. Въвеждане на входни данни. Въвеждат се входните данни, характерни за всеки механизъм. Напр. за ковашко-пресов механизъм те са дадени непосредствено след блоковата схема.

Блок 3. Предварително определяне на мощността на двигателя по приблизителен метод.

Блок 4. Избиране на двигател по условия: $P_n > P_{cp}$ и условия за пускане, ако е необходимо.

Блок 5. В случай на неизпълнение на условията за избор на двигателя, когато в каталога няма подходящ, се извежда съответно съобщение и се предлагат възможни изменения в заданието (например: да се избере двигател с друга синхронна скорост или да се попълни каталога с нови двигатели).

Блок 6. Предварително изчисляване на инерционния момент на електрозадвижването.

Блок 7. Решава се основното уравнение на движение.

Блок 8. Определя се дали инерционният момент на системата е оптимален и ако не е така, то в *Блок 9* се извършва корекция на инерционния момент и управлението се връща в *Блок 7*.

Блок 10. Изчислява се еквивалентният момент на двигателя.

Блок 11. Проверява се дали $M_{екв} \leq M_n$ и ако не е така, то в *Блок 12* се задава условието да се търси нов двигател с по-голяма мощност.

Блок 13. Построяват се графики на работата на електрозадвижването за един цикъл, а именно: $M_c = f(\alpha)$; $M_{об} = f(\alpha)$; $n_{об} = f(\alpha)$.

Блок 14. Извеждат се резултатите от изчисленията.

Програмата изчислява съпротивителната сила, приведените към вала на двигателя момент и мощност при ковашко-пресови машини, избира подходящ електродвигател и го проверява по допустимо нагряване.

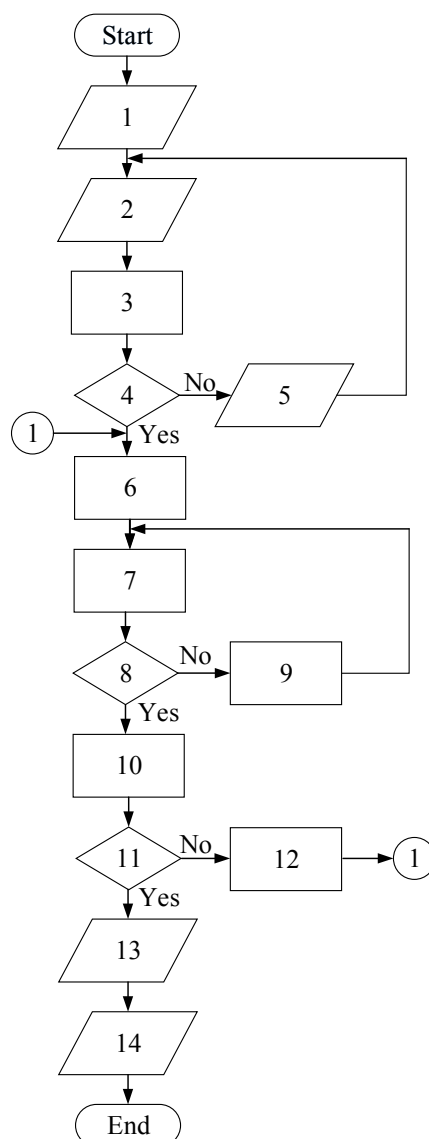
Входни данни са:

- радиус на коляното, m;
- дължина на мотовилката, m;
- разстояние до центъра на тежестта на мотовилката, m;
- маса на мотовилката, kg;
- маса на плъзгача и работния инструмент, kg;

- синхронна честота на въртене – 750, 1000, 1500 или 3000 min⁻¹;
- време за един цикъл на работа, s;
- к.п.д. на механизма;
- максимална съпротивителна сила, N;
- ход на плъзгача под действие на съпротивителната сила, mm.

Програмата автоматично създава текуща папка файлове, в които записва и съхранява изходните данни за отделните механизми. Цялата информация, необходима за работа с програмата, се изобразява на монитора.

Базата данни за електродвигатели включва в себе си асинхронни такива за номинално линейно напрежение 400 V в диапазон от мощности 0.37÷250 kW от сериите АО, АО2, АОР, АОС, АМ, 4АО, М, МО, МОМ.



Фиг. 3.2. Блокова схема на алгоритъм за определяне на мощността и избор на електродвигател и оптимален инерционен момент на маховика на електрозадвижването на коляно-мотовилкови механизми с възвратно-постъпателно движение.

Таблицы 3.3, 3.4 и 3.5 съдържат получените резултати от работата с програмата.

Табл. 3.3. Получени резултати за инерционен момент на маховика J_{\max} , предавателно число на редуктора i , еквивалентен момент $M_{\text{екв}}$ и време за цикъла $t_{\text{ц}}$.

n_0 , min^{-1}	Избран двигател		η , %	J_{\max} , kgm^2	i	$M_{\text{екв}}$, Nm	$t_{\text{ц}}$, s
	P_H , kW	Тип					
750	3.00	AM 132M-8	80.0	0.3575	3	36.10	0.26
		AO2132M-8	80.0	0.3709	3	32.31	0.26
		AO2-42-8	80.0	0.3712	3	32.31	0.26
1000	3.00	AO2132S-6	82.0	0.2395	4	27.42	0.26
		AM 132S-6	82.0	0.2384	4	27.71	0.26
		AO2-41-6	82.0	0.2399	4	27.11	0.26
1500	3.00	4AO 100LL-4D	82.0	0.1971	7	16.42	0.30
3000	2.40	AOC-42-2	78.4	–	13	7.67	0.29

Табл. 3.4. Получени резултати за средния съпротивителен и максималния съпротивителен момент.

n_0 , min^{-1}	P_H , kW	$M_{\text{с.ср.}}$, Nm	$M_{\text{с.макс.}}$, Nm
750	3.00	24.27	139.20
1000	3.00	18.20	104.40
1500	3.00	10.40	59.66
3000	2.40	5.60	32.12

Табл. 3.5. Данни на избраните двигатели.

n_0 , min^{-1}	Избран двигател		$I_{\text{ном}}$, A	$I_{\text{ст}}/$ $I_{\text{ном}}$	$M_{\text{ст}}/$ $M_{\text{ном}}$	$M_{\text{макс}}/$ $M_{\text{ном}}$	GD^2 , kgm^2
	P_H , kW	Тип					
750	3.00	AM 132M-8	7.9	4.5	1.9	2.1	0.158
		AO2132M-8	8.0	5.4	1.5	1.5	0.162
		AO2-42-8	8.0	5.0	1.5	1.5	0.160
1000	3.00	AO2132S-6	7.0	6.2	1.7	2.3	0.123
		AM 132S-6	7.1	5.8	2.2	2.4	0.126
		AO2-41-6	7.0	6.1	1.7	2.2	0.123
1500	3.00	4AO 100LL-4D	6.9	6.0	2.4	2.8	0.00752
3000	2.40	AOC-42-2	6.2	5.5	2.8	2.8	0.040

Резултатите от Табл. 3.3 и Табл. 3.4 са получени, като е задавана желана честота на въртене от потребителя, а програмата извежда възможните за случая електродвигатели (понякога само един двигател е подходящ).

С увеличаване на предавателното число на редуктора i намалява инерционният момент на необходимия маховик J_{\max} , времето за протичане на един цикъл $t_{\text{ц}}$ се запазва постоянно, а еквивалентният момент на необходимия двигател намалява.

Оптimalен по отношение на време за протичане на един цикъл и минимален допълнителен махов момент е вариантът при $n_0=1000 \text{ min}^{-1}$, предавателно число на редуктора $i=4$ с двигател тип АО2-41-6 с номинална мощност $P_H=3.00 \text{ kW}$.

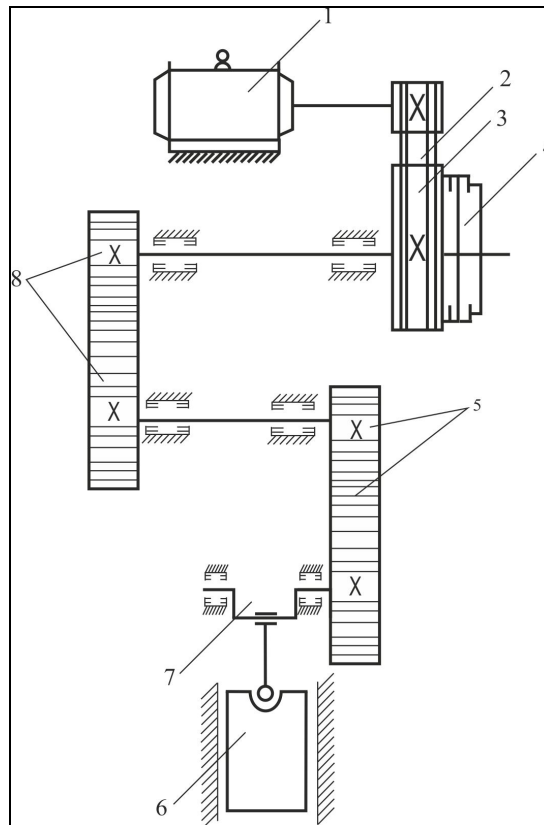
Логично с нарастване на синхронната честота на въртене в диапазона $750-3000 \text{ min}^{-1}$ маховият момент на ротора намалява, а се увеличават кратностите на пусковия и максималния момент на необходимите двигатели. С увеличаване на синхронната честота на въртене в диапазона $750-3000 \text{ min}^{-1}$ намаляват стойностите на средния и максималния съпротивителен моменти.

Динамично изследване на ковашко-пресова машина, задвижвана с асинхронен електрически двигател.

С цел ограничаване на пусковите токове, и съответно, за да се намали ударният момент на двигателя е необходимо да се анализира влиянието на условията на работа.

Предложен е математичен модел за изследване на преходните процеси в електрозадвижването на ковашко-пресова машина. Механизмът за задвижване е представен с едномасов динамичен модел.

Кинематичната схема на коляно-мотовилкова ковашко-пресова машина е показана на фигура 3.4. Въртеливото движение от електродвигателя 1 посредством клиноремъчната предавка 2 се предава на маховика 3, а след него чрез съединителя 4 и зъбните предавки 5 и 8 – на колянвия вал 7. Въртеливото движение чрез коляно-мотовилковия механизъм се преобразува в постъпателно движение на плъзгача 6. Използването на ремъци предлага потенциална икономия на разходи в сравнение с други методи на предаване на движение. Пресоване е възможно само при движение на плъзгача надолу. Обикновено работната операция се извършва при завъртане на колянвия вал на ъгъл $\alpha = (0^\circ \div 30^\circ)$ – тогава е именно ударът при пресоването. Той се отчита в посока, обратна на посоката на скоростта ω на колянвия вал, а 0° съответства на крайно долно положение на плъзгача. При ъгъл $\alpha = (30^\circ \div 360^\circ)$ работа не се извършва, т.е. пресата работи на празен ход. Електродвигателят работи с ударно циклично променливо натоварване. Големината на съпротивителния момент при изпълнението на технологичната операция (по време на удара) може да превиши десетки пъти средния съпротивителен момент за цикъла на работа.



Фиг. 3.4. Кинематична схема на коляно-мотовилкова ковашко-пресова машина

1 – електродвигател; 2 – клиноремъчна предавка; 3 – маховик; 4 – съединител; 5, 8 – зъбна предавка; 6 – плъзгач; 7 – колянов вал.

Ударният характер на съпротивителния момент води до ударно натоварване на електродвигателя – основна особеност в работата на ковашко-пресова машина, което затруднява избора на електродвигател. С цел да се изравни натоварването на електро-двигателя за времето на цикъла, в кинематичната схема се поставя маховик с голям инерционен момент. При изпълнение на работната операция маховикът отдава част от своята кинетична енергия, като помага на електродвигателя да преодолее натоварването. По време на празния ход електродвигателят връща кинетична енергия на маховика (наново го зарежда), като го ускорява. По този начин натоварването на електродвигателя по време на удара се намалява, а през празния ход се увеличава, т.е. извършва се изглаждане на $M_d = f(t)$.

Чрез прилагането на маховик е възможно да се намали необходимата мощност на електродвигателя средно $6 \div 10$ пъти в сравнение със случая на задвижване без маховик.

Механообзавеждането е представено чрез едномасов модел. След преобразуване уравнението на движението е:

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{p}{J_{\Sigma}\omega_1}(M - M_C) \quad (3.38)$$

където: M_C – съпротивителен момент на механизма; J_Σ – сумарен инерционен момент на двигателя и механизма, приведен към вала на двигателя; p – брой на двойките полюси на двигателя; $\omega_1 = 2\pi f_1 = \omega_b$ – ъглова скорост.

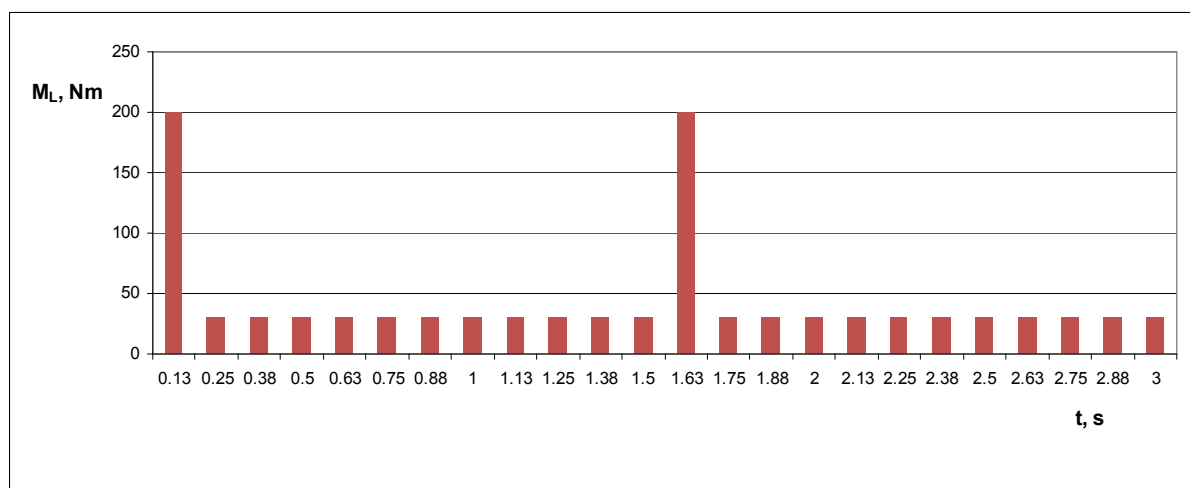
След трансформиране на уравнение (3.38) се получава:

$$\frac{ds}{d\tau} = -\frac{pM_b}{J_\Sigma\omega_b^2} \left[\frac{pu_b i_b L_m^*}{M_n \omega_b} (i_{sy}^* i_{rx}^* - i_{sx}^* i_{ry}^*) - M_C^* \right] \quad (3.39)$$

Пълната система диференциални уравнения, описваща динамиката на задвижването на ковашко-пресова машина с асинхронен двигател се получава от уравнения (3.4) и (3.39).

Три времево зависими функции – ω , M , M_C описват преходните процеси при електрозадвижванията на ковашко-пресови машини.

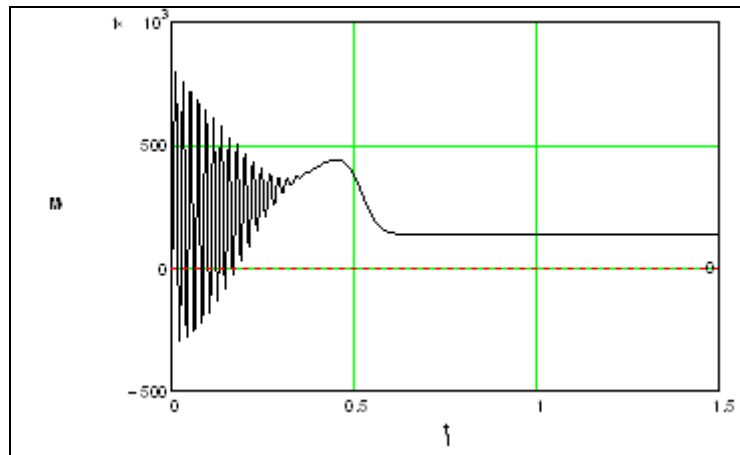
Съпротивителният момент за два цикъла на работа (3 s) е представен на фиг. 3.5.



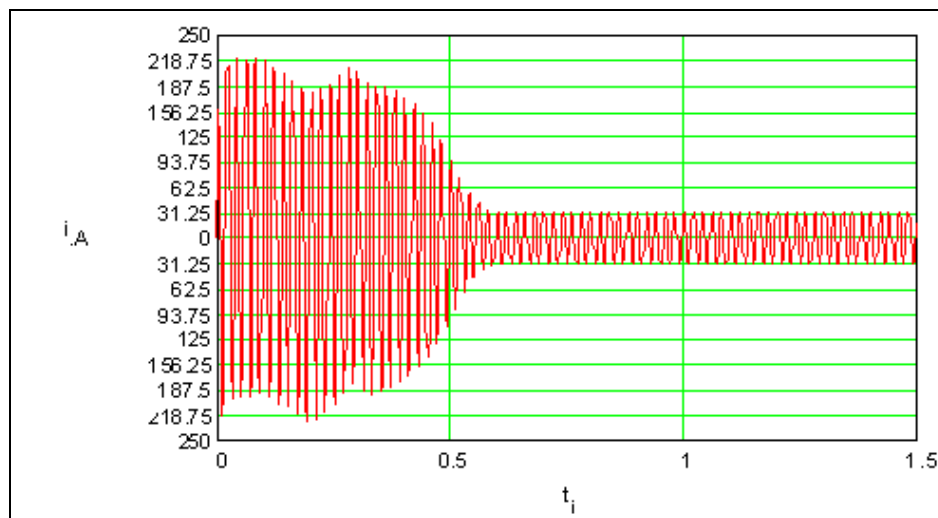
Фиг. 3.5: Характеристика $M_C=f(t)$.

Софтуерът *MathCAD* е използван за решаване на системата уравнения, включваща уравнения (3.4) и (3.39). Използвайки предложения математичен модел са изследвани преходните процеси. Получени резултати са представени на Фиг. 3.6÷3.7.

Разработеният математичен модел спомага за изследване на преходните процеси при пускане на ковашко-пресови машини. Той прави възможно определянето на ударния електромагнитен момент и пусковите токове.



Фиг. 3.6. Характеристика $M=f(t)$.



Фиг. 3.7. Характеристика $i_A=f(t)$.

По-долу са представени техническите данни на електрическия двигател, използван при изследванията.

Технически данни на електрическия двигател:

$$\begin{aligned}
 P_n &= 22kW; & U_n &= 380V; & f_n &= 50Hz; & p &= 2; \\
 n_n &= 1464 \text{ min}^{-1}; & I_{\phi, n} &= 24.1A; & J &= 0.07646 \text{ kgm}^2; & M_n &= 143.5Nm; \\
 \frac{I_{II}}{I_n} &= 7.0; & \frac{M_{II}}{M_n} &= 1.7; & \frac{M_{MAX}}{M_n} &= 2.2 \\
 r_s &= 0.4843\Omega; & x_s &= 1.154\Omega; & r_r' &= 0.619\Omega; & x_r' &= 1.195\Omega; \\
 x_m &= 51.719\Omega;
 \end{aligned}$$

Увеличаването на статорното активно съпротивление r_s^* води до значително намаляване на ударните токове и моменти и до по-слабо увеличение на времето за пускане. При намаляване на r_s^* се увеличават големината и броят на отрицателните стойности за момента, тъй като се увеличават времеконстантите на свободните съставлящи на преходните токове и моменти.

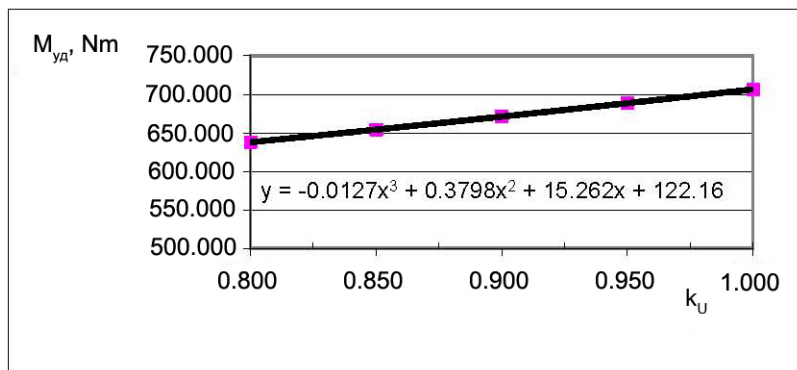
Увеличаването на роторното активно съпротивление $r_r^{'*}$ води до значително намаляване на ударните токове. С увеличаването на $r_r^{'*}$ $M_{y\partial}^*$ расте, като достига максимална стойност при такова $r_r^{'*}$, за което $s_m \approx 1$ и след това намалява. С увеличаване на $r_r^{'*}$ времето за пускане t_{II} намалява, като достига минимална стойност при съпротивление $r_r^{'*}$, съответстващо на роторно съпротивление на електродвигател с повишено хлъзгане, и след това нараства. Съпротивлението $r_r^{'*}$ има подобно на r_s^* влияние върху големината и броя на отрицателните стойности за момента.

С увеличаване на съпротивленията x_s^* и x_r^* намаляват значително ударните токове и моменти.

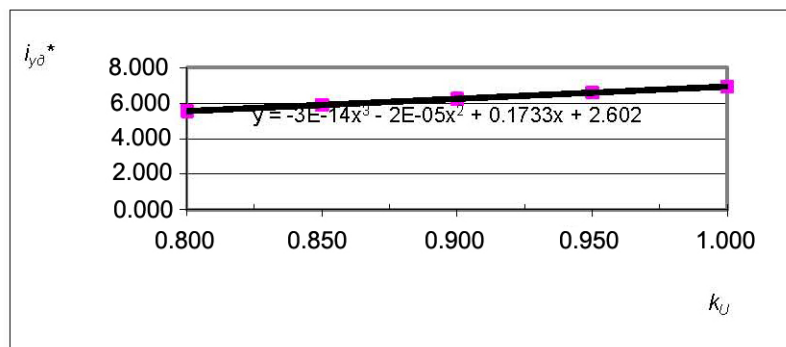
С увеличаване на съпротивлението x_m^* ударният момент и времето за пускане слабо нарастват, а ударният ток слабо намалява.

Резултатите от изследванията за влиянието на стойността на захранващото напрежение, което е отчетено с различни стойности на коефициента k_U при начална фаза $\varphi_0 = 0$, върху преходните процеси са представени графично на Фиг. 3.8. ÷ Фиг. 3.10.

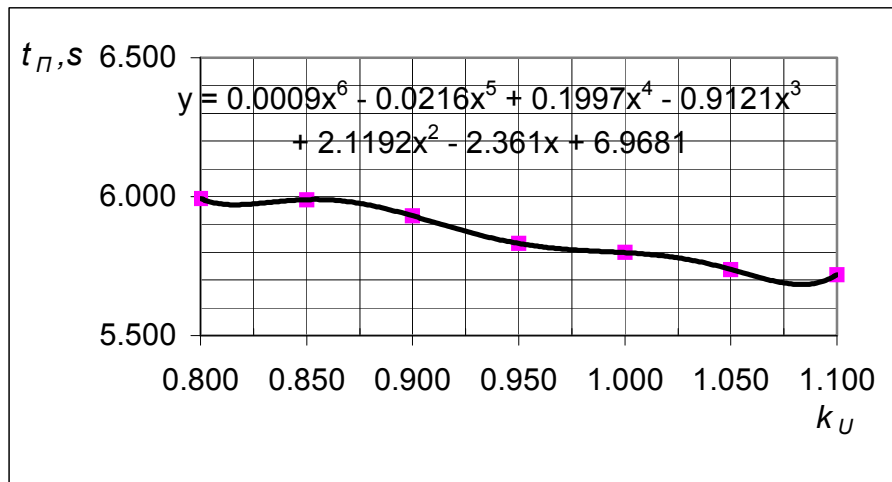
За получените зависимости е приложено апроксимиране и са изведени апроксимационните зависимости.



Фиг. 3.8. Влияние на големината на k_U върху ударния момент $M_{y\partial}^*$.



Фиг. 3.9. Влияние на големината на k_U върху ударния ток $i_{y\partial}^*$.



Фиг. 3.10. Влияние на големината на k_U върху времето за пускане $t_{П}$.

Изследвано е влиянието на началната фаза φ_0 на захранващото напрежение върху преходните процеси, като това е проведено само до $\varphi_0 = \pi \text{ rad}$, т.к. за $\varphi_0 \in (\pi \div 2\pi)$ се установи, че резултатите се повтарят.

При изменение на началната фаза φ_0 в диапазона от 0 до $\pi \text{ rad}$ с помощта на модела се получава, че ударният ток $i_{y\delta}^*$ се изменя от най-малката стойност 5.93 до най-голямата стойност 6.87 и се получава в различни фази – началната фаза φ_0 оказва влияние върху $i_{y\delta}^*$, който се изменя с 13.68%. При останалите интервали на изменение на φ_0 резултатите се повтарят.

Изследвано е влиянието на натоварването (статичния съпротивителен момент M_T^*) и на сумарния инерционен момент J_{Σ} върху преходните процеси.

С увеличаване на статичния съпротивителен момент M_T^* изменението на електромагнитния момент има колебателен характер с по-големи амплитуди и относително по-бавно затихване. Големините на $i_{y\delta}^*$ и $M_{y\delta}^*$ не зависят от M_T^* и остават постоянни, но времето за пускане $t_{П}$ нараства значително с нарастване на M_T^* .

Изменението на сумарния инерционен момент J_{Σ} оказва съществено влияние не само върху продължителността на преходните процеси, но и на характера на тяхното протичане. С увеличаване на отношението $\frac{J_{\Sigma}}{J_D}$ броят на значителните по големина колебания на преходния електромагнитен момент в началото на преходния процес се увеличават, а колебанията на скоростта и на електромагнитния момент в зоната на синхронната скорост намаляват. При намаляване на отношението $\frac{J_{\Sigma}}{J_D}$ броят на колебанията на

електромагнитния момент в началото на преходния процес намаляват, но рязко се увеличават колебанията на скоростта и на момента на електродвигателя в зоната на синхронната скорост, достигайки до твърде значителни амплитуди при относително малки стойности за J_{Σ} . При увеличаване на $\frac{J_{\Sigma}}{J_D} i_{y\delta}^*$ почти не се изменя, докато $M_{y\delta}^*$ и времето за пускане t_{II} нарастват значително.

Определянето на надеждността на работа за звената от механообзавеждането на електрозадвижването в редица случаи е свързано с количествена оценка за максималната стойност на електромагнитния преходен момент M_{\max} на асинхронния електродвигател. Относително просто аналитично решение на системата диференциални уравнения е възможно само в този случай, когато двигателят остава неподвижен по време на пускането. Тогава, за отношението $\frac{M_{\max}}{M_{II}}$ се получава:

$$\frac{M_{\max}}{M_{II}} = 1 + e^{-(\alpha_1 + \alpha_2)\tau_m} + \frac{\sqrt{1 + \alpha_2^2}}{\alpha_2 - \alpha_1} e^{-\alpha_1\tau_m} + \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)^2 - (1 + \alpha_1^2)}{(\alpha_2 - \alpha_1)\sqrt{1 + \alpha_2^2}} e^{-\alpha_2\tau_m}, \quad (3.38)$$

където α_1 и α_2 са коефициенти на затихване, а τ_m е абсциса на първия максимум в кривата на електромагнитния момент. След определянето на α_1 , α_2 и τ_m и пресмятане се получава $M_{\max} = 2.582M_{II} = 629.879 Nm$; $M_{y\delta}^* = \frac{M_{\max}}{M_N} = 4.389$. Вижда се, че полученият от горния израз ударен момент е близък до стойностите, получени с помощта на модела.

Определяне на оптимални махови маси при ковашко-пресови машини.

Определянето на оптимални махови маси и мощност на електрозадвижването има решаващо значение. При намаляване на маховите маси електродвигателят ще се претоварва по време на работната операция, а при увеличаване на маховите маси – по време на празен ход. Влияние оказва и съотношението между времената на работния и празния ход. При малко време на празния ход електродвигателят не успява да възстанови енергията на маховите маси и при следващия работен цикъл той ще се претовари.

Динамичното поведение на КПМ може да се опише чрез система диференциални уравнения от първи ред, в която независима променлива е ъгълът на завъртане на колянвия вал α , а неизвестни функции са ω и t :

$$\left| \begin{array}{l} \frac{d\omega}{d\alpha} = \frac{M\partial - M_c}{J\omega} \\ \frac{dt}{d\alpha} = \frac{1}{\omega} \end{array} \right. \quad (3.39)$$

Понеже за преси се използват изключително асинхронни двигатели, то за определяне на $M\partial=f(\omega)$ може да се използва формулата на Клос:

$$M\partial = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} = \frac{2M_k(\omega_o - \omega) \cdot (\omega_o - \omega_k)}{(\omega_o - \omega)^2 + (\omega_o - \omega_k)^2}, \quad (3.40)$$

където: ω_o – синхронна ъглова скорост;
 ω_k – критична ъглова скорост;
 M_k – критичен момент;
 s_k – критично хлъзгане.

За системата диференциални уравнения се получава:

$$\left| \begin{array}{l} \frac{d\omega}{d\alpha} = \frac{2M_k(\omega_o - \omega) \cdot (\omega_o - \omega_k) - M_c}{J\omega \left[(\omega_o - \omega)^2 + (\omega_o - \omega_k)^2 \right]} \\ \frac{dt}{d\alpha} = \frac{1}{\omega} \end{array} \right. \quad (3.41)$$

Решението на системата (3.41) са двете функции – $\omega=f(\alpha)$ и $t=f(\alpha)$. От тях се получава зависимостта $\omega=f(t)$, която от своя страна води до определяне на изменението на двигателния момент във функция от времето – $M\partial=f(t)$. От друга страна, чрез $t=f(\alpha)$ може да се получи изменението на съпротивителния момент на системата $M_c=f(t)$.

След запознаване с кинематичната схема и диаграмата на работа на коляно-мотовилкова ковашко-пресова машина, а също и с диференциалните уравнения, описващи динамиката на електрозадвижването на коляно-мотовилкова КПМ може да се пристъпи към изследване на динамиката ѝ чрез съставен алгоритъм, на базата на който е създадена програма на MATLAB за персонален компютър.

Реализираната компютърна програма работи в интерактивен режим. Следва да се изпълняват последователно съответните инструкции.

Техническите данни, които се въвеждат са:

- синхронна честота на въртене на електродвигателя, min^{-1} ;
- номинална честота на въртене на електродвигателя, min^{-1} ;

- предавателно отношение между вала на електродвигателя и колянвия вал;
- кратност на максималния момент на електродвигателя;
- номинална мощност на електродвигателя;
- точности (толеранси) за скорост и време при решаване на диференциалните уравнения;
- стойности на компонентите на инерционния момент на електрозадвижването, kgm^2 ;
- стойности на съпротивителния момент за интервала $0\div 30^\circ$;
- стойност на съпротивителния момент за интервала $30\div 360^\circ$;

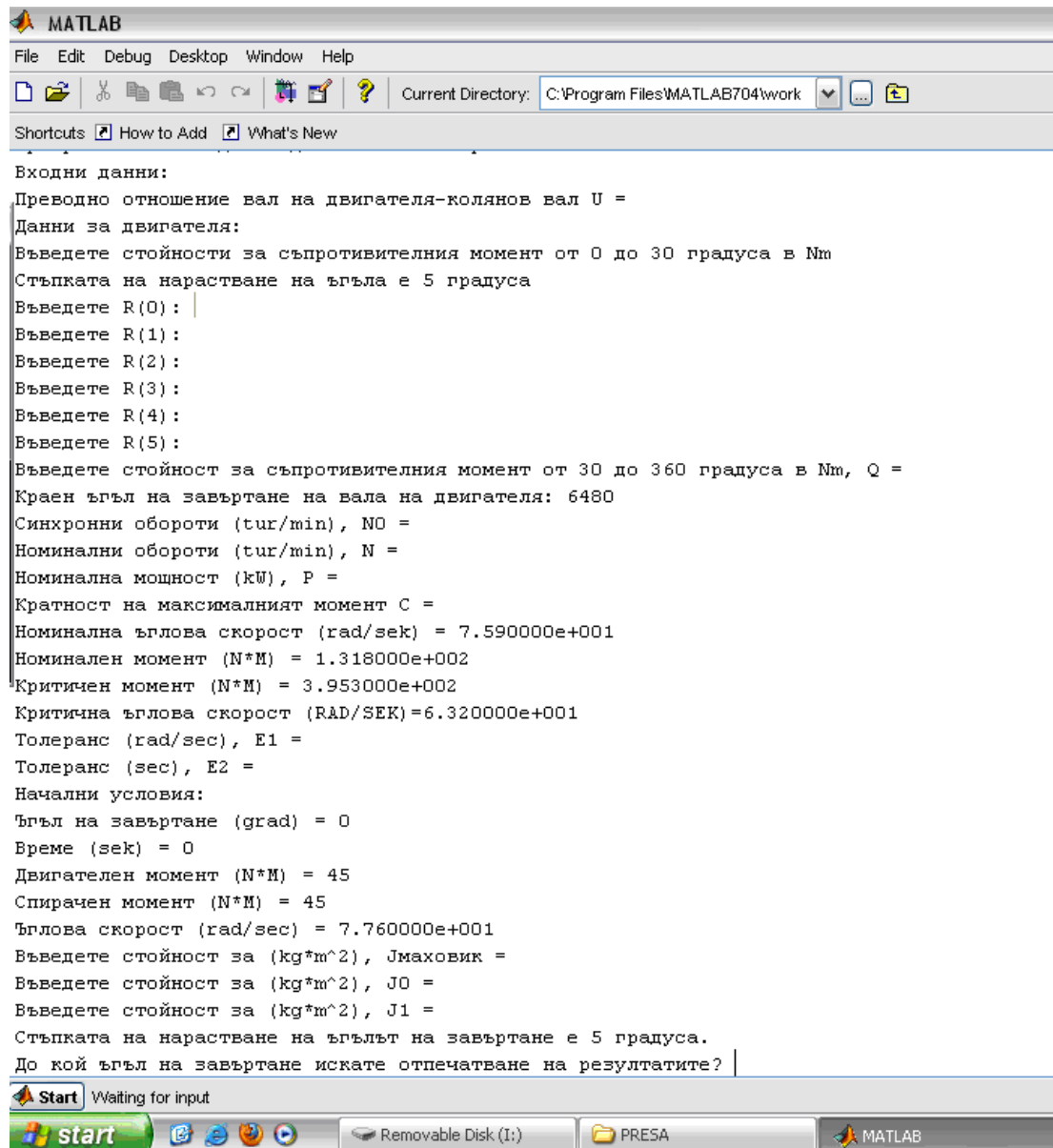
На фиг. 3.12 е представен диалоговият прозорец на програмата.

Програмата работи със стойности по подразбиране за всички параметри. Ако потребителят иска да промени някоя стойност, въвежда число и след това потвърждава с Enter. Всички резултати се записват като ASCII текстов файл в папката, където е файл presa.m -> presa.txt. Този файл симулира CSV формат и може да се импортира в Excel (ако има някакъв смисъл за потребителя).

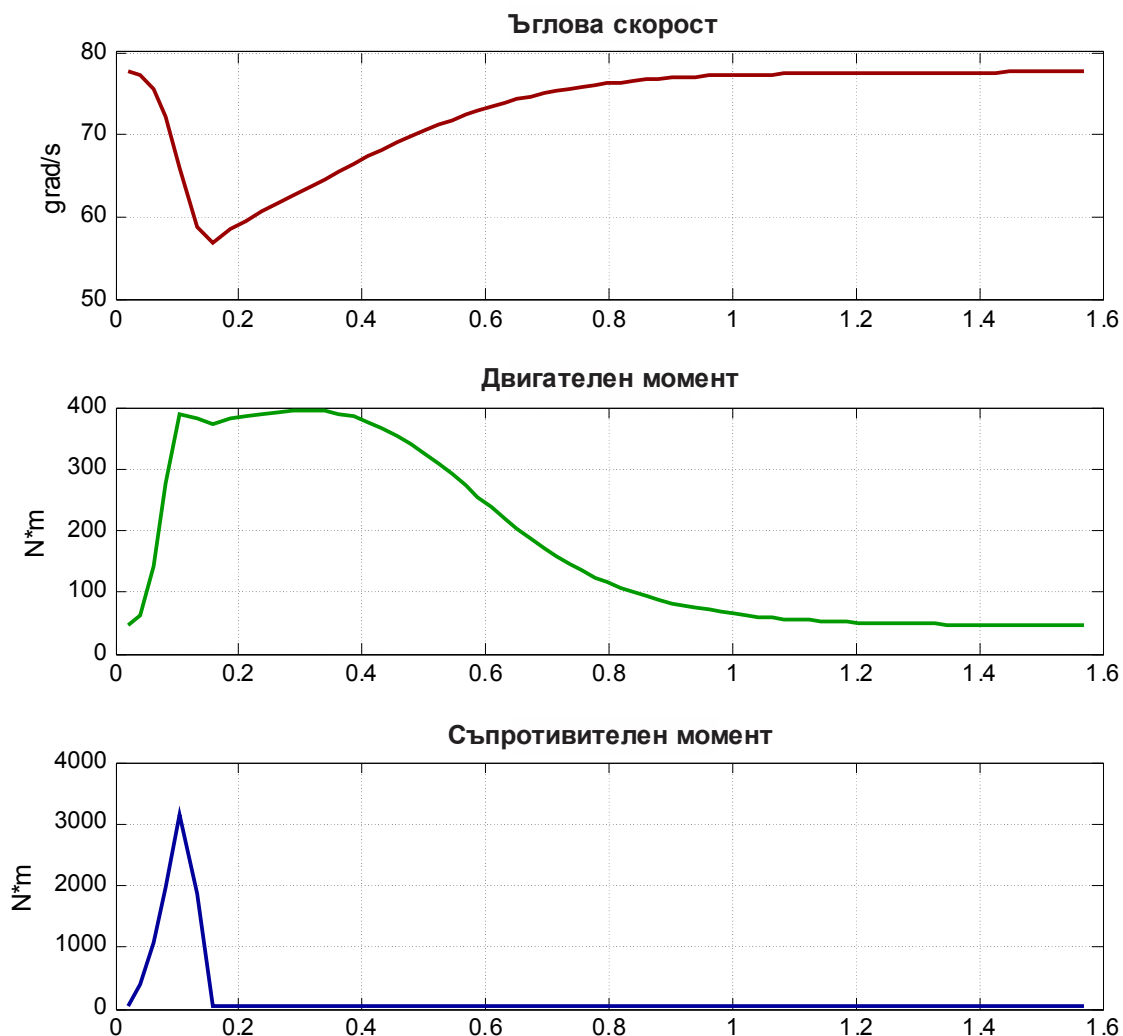
Проведени са изчисления със създадената програма за различни стойности на маховия момент, т.е. с различни маховици при едно и също електрозадвижване на ковашко-пресова машина. Всеки път програмата ни връща от определен етап нататък, т.е. последователно може да се задават различни маховици, т.е. маховици с различен инерционен момент, за да се оцени поведението на цялата електромеханична система.

Програмата извежда на екран характеристиките ω , M_d , M_c във функция от времето за различни стойности на инерционния момент на участващия като компонент в електрозадвижването маховик, като част от получените резултати са представени на фиг. 3.13.

Като изводи може да се каже, че ударното натоварване предизвиква колебания в момента и тока на електродвигателя. Освен това води до увеличаване на променливите загуби на електрическа енергия в електродвигателя и захранващата го електрическа мрежа, доколкото тези загуби са пропорционални на стойността на тока на квадрат. При изравняване на товаровия график споменатите загуби на електрическа енергия се намаляват.



Фиг. 3.12. Диалогов прозорец на програмата.



Фиг. 3.13. Характеристики ω , M_d , M_c във функция от времето за стойности на инерционния момент на маховика $J_{\text{маховик}}=4 \text{ kgm}^2$.

Изследване на загубите на енергия в асинхронен електродвигател за задвижване на ковашко-пресова машина.

Проведеният анализ на поведението на асинхронната машина е едновременно от позиция на статора и на ротора. В асинхронния двигател се преобразува електрическа енергия, подведена към статора от мрежата, в механична енергия, получавана на вала на ротора. Това преобразуване на енергията се съпровожда със загуби. Уравнението на баланса на активната мощност може да се запише така:

$$P_1 = \Delta P_{e1} + \Delta P_{M1} + \Delta P_{e2} + \Delta P_{MEH} + \Delta P_{\text{дон.}} + P_2, \quad (3.42)$$

където: $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$ – електрическа мощност, подведена към статора от мрежата; (3.43)

$\Delta P_{e1} = m_1 I_1^2 R_1$ – електрически загуби на мощност, свързани с нагряването на намотките на статора, при протичането на ток по тях; (3.44)

$\Delta P_{M1} = U_1^2 f^{1,3}$ – магнитни загуби на мощност, свързани с пренамагнитване на стоманата на сърцевината на статора и неговото нагряване от вихрови токове; (3.45)

$\Delta P_{e2} = m_2 I_2^2 R_2$ – електрически загуби на мощност в намотките на ротора; (3.46)

ΔP_{MEX} – механични загуби на мощност от триене в лагерите и на въртящите се части с въздуха (вентилационни загуби); (3.47)

$\Delta P_{don.}$ – допълнителни, трудно отчитащи се загуби на мощност от вихрови токове, обусловени от магнитните полета на разсейване, от пулсациите на магнитния поток, от наличието на висши хармоници и други подобни (допълнителните загуби се приемат $\Delta P_{don.} \approx 0,005 P_{НОМ}$); (3.48)

P_2 – механична мощност на вала на двигателя.

Електрическите загуби в ротора са правопрпорционални на хлъзгането:

$$\Delta P_{e2} = s P_{EM}, \quad (3.49)$$

където P_{EM} – електромагнитна мощност на двигателя:

$$P_{EM} = P_1 - (\Delta P_{M1} + \Delta P_{e1}). \quad (3.50)$$

Що се касае до магнитните ΔP_{M1} и механичните ΔP_{MEX} загуби на мощност, то те практически не зависят от натоварването. Сумата от тези загуби е приблизително постоянна.

Механичните загуби на мощност за двигатели с външно обдухване (с външен диаметър на статора $0,1 \leq D_a \leq 0,5$ m) са:

$$\Delta P_{MEX} = K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 D_a^4; \quad (3.51)$$

$$n = n_s (1 - s) \text{ – честота на въртене на двигателя;} \quad (3.52)$$

$$K_T = 1 \text{ за двигатели с } 2p=2 \text{ и } K_T = 1,3(1 - D_a) \text{ при } 2p \geq 4;$$

D_a – външен диаметър на статора.

Загубите от триене в лагерите и от съпротивлението на въздуха са малки като правило, и могат да бъдат пренебрегвани за груби изчисления.

Изборът на точката на максимума на к.п.д. зависи от проектанта, к.п.д. има максимум в област, където постоянните загуби (ΔP_{M1} и ΔP_{MEX}) са равни на

променливите загуби – електрическите (ΔP_{e1} и ΔP_{e2}). Електрическите загуби в ротора са пропорционални на хлъзгането и затова асинхронните двигатели са икономични при неголеми хлъзгания – 1÷4%.

Приетата енергия от мрежата при пусков режим е:

$$W_{ST} = \sum_{k=0}^{a_{n-1}} [(P_{a_k}) t_n] + \sum_{k=0}^{a_{n-1}} [(P_{b_k}) t_n] + \sum_{k=0}^{a_{n-1}} [(P_{c_k}) t_n] \quad (3.53)$$

- a_{n-1} – номер на точка от времевата ос, до която трае преходния процес.
- P_{a_k} , P_{b_k} , P_{c_k} – мощности, консумирани съответно от фаза А, фаза В и фаза С.

Приетата енергия от мрежата при установен режим е:

$$W_{SS} = \sum_{k=a_{n-1}}^{n-1} [(P_{a_k} + P_{b_k} + P_{c_k})] [(n-1)\delta t - t_n] \quad (3.54)$$

- δt – дискрета на времевата ос в секунди;
- t_n – времетраене на преходния процес, в s.

Загубите на енергия в челните съединения в пусков режим са:

$$W_{1ST} = 0.5r_1 \sum_{k=0}^{a_{n-1}} [(I_{a_k})^2 + (I_{b_k})^2 + (I_{c_k})^2] \delta t \quad (3.55)$$

- r_s – активно съпротивление на 1 фаза на статорната намотка;
- I_a , I_b , I_c – фазови статорни токове.

Загубите на енергия в челните съединения в установен режим са:

$$W_{1SS} = 0.5r_s \sum_{k=a_{n-1}}^{n-1} [(I_{a_k})^2 + (I_{b_k})^2 + (I_{c_k})^2] \delta t \quad (3.56)$$

Енергия на движещите се маси и полезна работа в пусков режим:

$$W_{MMST} = 0.5J\omega_b^2 + M_C\omega_b t_{a_{n-1}}, \quad (3.57)$$

- където:
- J – сумарен инерционен момент на електрозадвижването;
 - ω_b – номинална кръгова честота;
 - M_C – съпротивителен момент, Nm

Енергия на движещите се маси и полезна работа в установен режим:

$$W_{MMSS} = \sum_{k=a_{n-1}}^{n-1} [M_k \omega_k \delta t] \quad (3.58)$$

Отделена топлина в двигателя при пускане:

$$W_{HST} = W_{ST} - W_{MMST} \quad (3.59)$$

Отделена топлина в двигателя в установен режим:

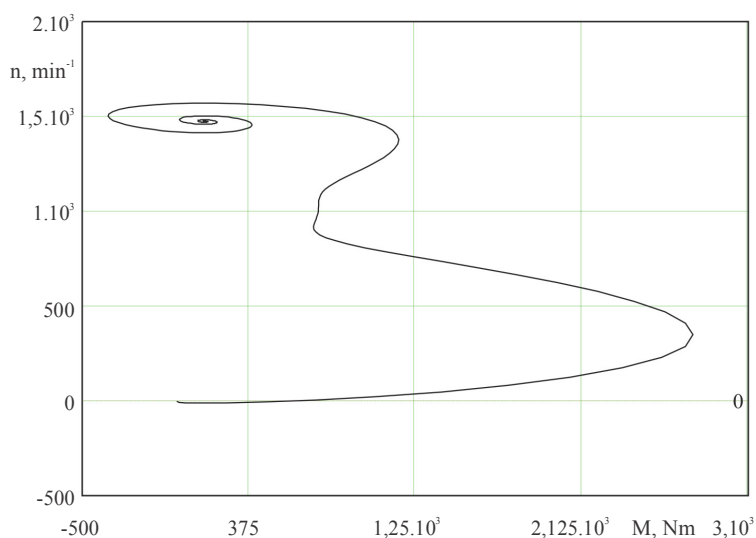
$$W_{HSS} = W_{SS} - W_{MMSS} \quad (3.60)$$

Както бе изтъкнато, най-препоръчителен, ефективен и икономичен начин за повишаване на енергията, отдадена от маховика е повишаването на скоростта на електрическия двигател в началото на всеки цикъл. Необходимо е да се осигури управление на електрическия двигател. Най-целесъобразно е прилагането на честотно управление на електрическия двигател, т.к. когато честотата на захранващото напрежение нараства, синхронната скорост се повишава също, откъдето началната скорост в началото на работната операция също. В случай на такова управление при кратко време за празен ход ще се постигне бързо повишаване на скоростта. Използването на регулируемо електрозадвижване повишава цената на ковашко-пресовите машини с до 5-15%, но допълнителните разходи ще се възстановят бързо поради повишаване на производителността.

Техническите данни на електрическия двигател, използван при моделните изследвания бяха представени по-горе.

Решаването на системата диференциални уравнения, която описва динамичното поведение на електрозадвижванията на ковашко-пресови машини е сложна задача. Софтуерът *MathCAD* е използван за решаване на системата диференциални уравнения. Използвайки предложения математичен модел са изчислени компонентите на загубите на енергия при различни стойности на честотата на захранващото напрежение. Получените резултати са представени на фиг. 3.17 и Табл. 3.7.

Разработеният математичен модел спомага за изследване на преходните процеси при пускане на механизма на ковашко-пресова машина с честотно управление и по-конкретно определяне на компонентите на загубите на енергия. Разработеният модел прави възможно определянето на правилна настройка на параметрите на честотното управление с цел постигане на персонализирани изисквания.



Фиг. 3.17. Механична характеристика $M=f(n)$, честота 50 Hz.

Табл. 3.7. Компоненти на загубите на енергия

Честота, Hz	t_{st} , s	W_{ST} , $\times 10^6$ Joule	W_{SS} , $\times 10^6$ Joule	W_{1ST} , $\times 10^3$ Joule	W_{ISS} , Joule	W_{MMST} , $\times 10^4$ Joule	W_{MMSS} , $\times 10^4$ Joule	W_{HST} , $\times 10^6$ Joule	W_{HSS} , $\times 10^6$ Joule
50	0.492	4.971	7.062	2.539	144.49	5.356	4.466	4.917	7.017
60	0.248	3.167	10.990	4.012	225.25	5.640	6.628	3.110	10.930
70	0.346	6.734	9.476	6.136	253.05	7.710	7.118	6.657	9.405
80	0.594	17.460	5.918	9.019	241.73	10.710	6.357	17.350	5.854

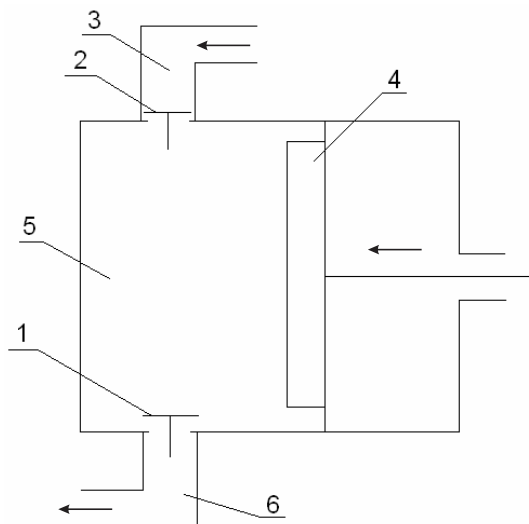
Изводи към Глава 3

- Разработен е математичен модел на електромеханичната система на ковашко-пресова машина;
- Направен е избор на параметрите на електромеханичната система и границите на тяхното изменение при изследванията;
- Избран е компютърен метод за решаване на математическия модел;
- Извършено е автоматизирано определяне на необходимата мощност и избор на електродвигатели за ковашко-пресови машини;
- Изследвано е влиянието на стойността на захранващото напрежение върху величините на преходните процеси;
- Изследвано е влиянието на началната фаза φ_0 на захранващото напрежение върху величините на преходните процеси;
- Изследвано е влиянието на натоварването и на сумарния инерционен момент на системата върху преходните процеси;
- Изследвано е влиянието на параметрите на заместващата схема на асинхронната машина върху величините на преходните процеси;
- Проведени са изчисления със създадена програма за различни стойности на маховия момент, т.е. с маховици с различен инерционен момент, за да се оцени поведението на цялата електромеханична система;
- Определени са компонентите на загубите на енергия при пускане на ковашко-пресова машина с честотно управление.

Глава 4 „Преходни процеси и динамични натоварвания при асинхронни машини при бутални компресори. Изследване на динамичното поведение на електрозадвижването на бутални компресори.” обхваща изследвания на електрозадвижвания на бутални компресори, чиято работа също е характерна с ударни натоварвания.

Описани са техническите особености на компресорите.

Буталните компресори са съставени главно от работен цилиндър и бутало; има смукателен и изпускателен клапани, обикновено разположени в капака на цилиндъра. За придаване на буталата на възвратно-постъпателно движение в повечето компресори има механизъм-манивела с колянвия вал. При буталния компресор, буталото извършва праволинейно-възвратно движение в цилиндъра 5 – фиг. 4.2. При движение на буталото 4 отляво надясно в цилиндъра се създава вакуум, под действието на външното (атмосферно) налягане се отваря всмукателният клапан 1 и се засмуква газ в цилиндъра. Газът постъпва през всмуквателния тръбопровод 3, който обикновено в началото си е снабден с филтър. Когато буталото започне обратния си ход, всмуквателният клапан се затваря, налягането на газа в цилиндъра се увеличава. Нагнетателният клапан 2 се отваря и сгъстеният въздух се изтласква в нагнетателния тръбопровод 6. През него газът обикновено се подава в специален резервоар, а оттам към консуматорите. Този резервоар намалява колебанията на налягането на сгъстения въздух за потребителите.



Фиг. 4.2. Устройство на буталния компресор

Обект на изследвания са целесъобразно определяне на необходимата мощност, анализиране на работата и поведението на компресорни системи с оглед възможностите за подобряване на енергийната ефективност както за вече съществуващи системи, така и за такива в етапа на проектиране.

Чрез използване на основните зависимости, описващи характерните величини при буталните компресори, са избрани конкретни електрически

двигатели, като при това се отчитат особеностите в различните случаи – два компресора, работещи в паралел; единичен двустъпален компресор, като това е извършено по различни методи. Това се явява стъпка към автоматизираното проектиране на такива машини.

Извършено е автоматизирано определяне на необходимата мощност и избор на електродвигатели за бутални компресори, като блоковата схема е същата, като при ковшко-пресовите машини – фиг. 3.2. Същата е и базата данни, отнасяща се за възможните за избор електрически двигатели.

Входни данни са:

- вид на сгъстявания газ – въздух, кислород, водород, хлор, въглероден окис, въглероден двуокис, етан, етилен, ацетилен, хелий, азот, амоняк, пропан или пропилен;
- брой цилиндри;
- синхронна честота на въртене – 750, 1000, 1500 или 3000 min⁻¹;
- предавателно отношение на редуктора;
- к.п.д. на редуктора;
- к.п.д. на компресора;
- начин на пускане – на празен ход или при максимален товар.

Получени резултати при многократно използване на програмата са дадени в Табл. 4.8 и Табл. 4.9.

Потвърждава се твърдението, че на избора и оразмеряването на системата за задвижване сравнително голямо влияние оказва диапазонът на изменение на статичния момент, който представлява отношението на статичните моменти при максимално и минимално натоварване на механизма (изчислени обикновено при номинална скорост).

С увеличаване на предавателното число на редуктора намалява инерционният момент на необходимия маховик J_{\max} и времето за пускане $t_{\text{п}}$, а се увеличава времето за протичане на един цикъл $t_{\text{ц}}$.

Оптимален по отношение на минимално време за пускане и минимален допълнителен махов момент се явява вариантът при $n_0=750 \text{ min}^{-1}$ и предавателно число на редуктора $i=30$.

Изборът на синхронна (и оттам номинална) честота на въртене на електродвигателите се извършва спрямо номиналната честота на въртене на механизма и предавателното число на предавката. В тази връзка е добре, че е налице възможност да се проведат вариантни изчисления. Целесъобразният избор на честотата на въртене на електродвигателите и предавателните отношения влияят на протичането на преходните процеси, а оттам и производителността на механизмите.

Винаги е необходим компромис между две тенденции:

- конструкторите на механизми предпочитат малки предавателни отношения и оттам ниски честоти на въртене на електродвигателите, което води до повишаване на масо-габаритните показатели на електродвигателите;

- конструкторите на електрообзавеждане от своя страна предпочитат обратното – електродвигатели с възможно по-високи честоти на въртене и малки габарити и маса, водещо на свой ред до редуктори с големи предавателни отношения и по-висока цена.

Табл. 4.8. Получени резултати за инерционния момент на маховика J_{\max} , еквивалентния момент $M_{\text{екв}}$, време за цикъла $t_{\text{ц}}$, време за пускане $t_{\text{п}}$ в случай на максимално натоварване при пускане (бр. цилиндри – 1, к.п.д. на редуктора 95%, к.п.д. на компресора 70%)

n_0 , min^{-1}	Предавателно отношение на редуктора	Избран електродвигател		J_{\max} , kgm^2	$M_{\text{екв}}$, Nm	$t_{\text{ц}}$, s	$t_{\text{п}}$, s
		$P_{\text{н}}$, kW	Тип				
750	10	4.0	AM 160MK-8	2.4409	19.20	0.818	1.970
750	20	2.2	AO2-41-8	1.3747	10.61	1.639	2.729
			AO2 132S-8	1.3611	10.63	1.639	2.704
			AM 132-8D	2.3311	9.44	1.639	3.282
750	30	1.5	4AO 112M-8D	0.0343	8.82	2.460	0.066
750	40	1.1	4AO 100LL-8D	0.2554	6.48	3.281	0.674
750	50	0.75	4AO 100L-8D	0.2475	5.17	4.113	0.962
1000	10	4.0	AM 132MK-6	1.2501	19.20	0.818	1.970
1000	20	2.2	4AO 112M-6D	0.3831	10.61	1.639	2.729
1000	30	1.5	4AO 100L-6D	0.2474	8.82	2.460	0.066
1000	40	1.1	4AO 90L-6D	0.1532	6.48	3.281	0.674
1000	50	1.1	4AO 90L-6D	0.0262	5.17	4.113	0.962
1500	10	5.3	AOC-52-4	0.3596	16.44	0.423	0.815
1500	20	3.0	4AO 100LL-4D	0.2223	11.04	0.822	0.741
1500	30	2.0	AOC-42-4	0.4612	5.41	1.270	2.194
1500	40	1.5	4AO 90L-4D	0.0932	6.04	1.657	0.581
			AOC-41-4	0.4835	4.04	1.694	3.028
1500	50	1.1	4AO 90S-4D	0.0894	4.82	2.076	0.860
3000	10	10.0	AO2П-51-2	0.4885	16.02	0.205	2.104
3000	20	5.3	AOC-52-2	0	6.55	0.419	276.12
3000	30	4.0	4AO 112M-2D	0.1308	6.14	0.617	1.196
3000	40	2.4	AOC-42-2	0.1183	4.04	0.847	1.763
3000	50	2.2	4AO 90L-2D	0.0487	4.26	1.034	0.799

Табл. 4.9. Получени резултати за средния съпротивителен момент $M_{c.ср.}$ и максималния съпротивителен момент $M_{c.маx}$ в случай на максимално натоварване при пускане (бр. цилиндри – 1, к.п.д. на редуктора 95%, к.п.д. на компресора 70%)

n_0, min^{-1}	i	$M_{c.ср.}, \text{Nm}$	$M_{c.маx}, \text{Nm}$
750, 1000, 1500, 3000	10	12.04	77.32
750, 1000, 1500, 3000	20	6.02	38.66
750, 1000, 1500, 3000	30	4.01	25.77
750, 1000, 1500, 3000	40	3.01	19.33
750, 1000, 1500, 3000	50	2.41	15.46

По аналогичен начин, както в Глава 3, са получени системи от диференциални уравнения, описващи преходните процеси при електрозадвижването на бутални компресори.

Изследвано е електрозадвижване с асинхронен двигател за бутален компресор.

Построена е механичната характеристика на двигателя, като се задават различни стойности за хлъзгането s и се получават съответните стойности за двигателния момент M_{∂} и ъгловата скорост ω_i .

Определени са стойностите на ъгловия момент на вала на двигателя за различни ъгли на завъртане на вала на компресора. В сила е следната зависимост:

$$M_{\partial i} = \frac{M_{ci} + (M_{cp} - M_{ci})e^{-\frac{t_i}{T_M}}}{i}, \text{Nm} \quad (4.36)$$

M_{ci} - съпротивителен момент на вала на компресора за даден ъгъл.

Изчислени са и времената за завъртане на вала на съответните ъгли. По изчислените данни построяваме графика $M_{\partial} = f(\alpha)$.

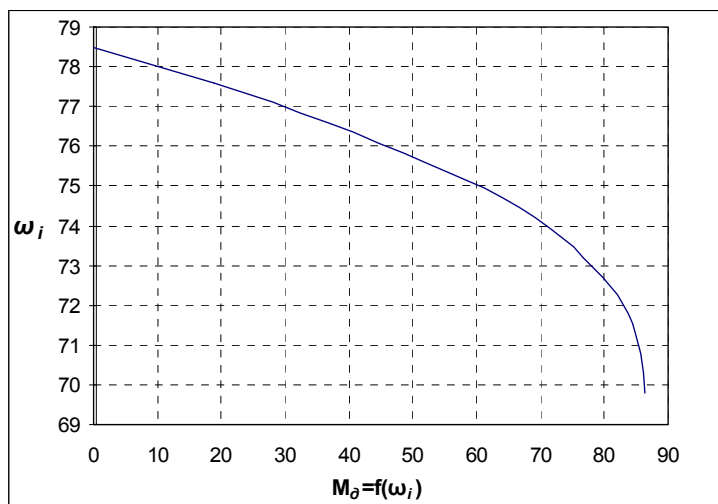
Определянето на текущите стойности на съответстващата мощност на вала на електродвигателя и тока е по формулите:

$$P_{2i} = M_{\partial i} \cdot \omega_i, \text{W}; \quad I_{\partial i} = \frac{P_{2i}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta \cos \phi}, \text{A} \quad (4.38)$$

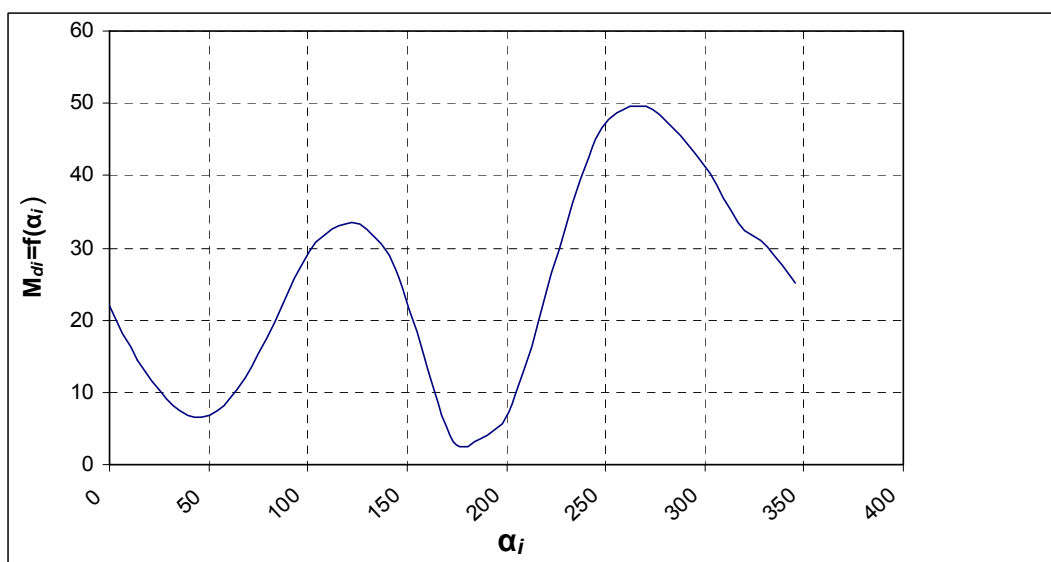
От получените стойности на $I_{\partial i}$ е определен еквивалентният ток.

Избраният двигател за дадения механизъм по представената методика удовлетворява изискванията към естеството на дадения технологичен процес.

Графични резултати са показани на фиг. 4.21 и фиг. 4.22.



Фиг. 4.21. Работен участък на механичната характеристика



Фиг. 4.22. Стойности на момента на вала на двигателя за различните ъгли на завъртане

Разгледана е работата на комплексната система производствен агрегат – електродвигател. Вследствие работата на модела на механичната система – буталния компресор, съгласувано с естествената механична характеристика на асинхронния двигател се получава функцията на $\omega = f(t)$, от нея се извежда хлъзгането на асинхронния двигател $s = f(t)$, което определя естеството на динамичното му натоварване. Всички величини са представени във времевата област.

Натоварването е динамично, но само в определени граници на хлъзгането s . Двигателят в първия момент покрива само загубите от предавката и триенето. Анализът показва, че за известен период от време моментът на компресора превишава този на двигателя, но насъбраната

кинетична енергия поема натоварването. След това двигателят поема натоварването и развърта инерционните маси, в които се насъбира отново кинетичната енергия. След като цикълът е завършен отново ще започне повтарянето му.

От графичното построяване на момента на двигателя не се очертава ясно динамичният максимален момент, но може да се отчете приблизително, че този момент е по-малък от максималния момент от механичната характеристика на двигателя, следователно двигателят има възможности и покрива най-големите моменти от натоварването му по време на цикъла на работа.

Динамичните промени са обусловени от баланса на моментите, т.е. когато натоварването се увеличи на вала на двигателя хлъзгането се увеличава, с което намалява приведеното активно съпротивление на ротора, от което се увеличава токът в ротора, а оттам и моментът на вала на двигателя, т.е. всички величини, свързани с особеностите на асинхронния двигател следват динамичните промени на хлъзгането.

Изводи към Глава 4:

- По представена методика е избран и проверен електродвигател за бутален компресор;
- Избрани са конкретни електрически двигатели чрез използване на основните зависимости, описващи характерните величини при буталните компресори, като при това се отчитат особеностите в различните случаи;
- Разработен е математически модел на електромеханичната система на бутални компресори;
- Направен е избор на параметрите на електромеханичната система и границите на тяхното изменение при изследванията;
- Избран е компютърен метод за решаване на математическия модел на електрозадвижването на бутален компресор;
- Извършено е автоматизирано определяне на необходимата мощност и избор на електродвигатели за бутални компресори;
- Изследвано е влиянието на стойността на честотата на въртене и предавателното число на редуктора върху необходимия допълнителен махов момент, т.е. необходимостта от маховици с различен инерционен момент, за да се оцени поведението на цялата електромеханична система.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обект на работа по дисертационния труд са приложни механизми (ковашко-пресови машини и бутални компресори) и техните електрокомпоненти.

Разработени са математически модели на асинхронната машина, на механизмите на ковшко-пресови машини и бутални компресори и на електромеханичната система при преходни процеси. Разработени са алгоритми и модели за изследване на динамичните натоварвания. С използване на подходящи програмни продукти са изследвани електромеханичните преходни процеси и динамичните натоварвания при различни начални условия и параметри на електрическата и механичната част на електрозадвижванията. Изследвани са влиянията на параметрите на асинхронната машина и на механизмите върху величините на електромеханичните преходни процеси. С тяхно участие могат да се усъвършенстват методите за изчисляване на мощността, за избирането и проверката на електродвигателите по загряване и претоварване. С тяхното използване ще се усъвършенства определянето на енергетичните показатели и загубите в електродвигателите при динамични режими. Определени са консумираните мощности и загубите на енергия в асинхронните машини по време на преходните процеси, което е в пряка връзка с проектирането на електрозадвижването и избора на електродвигател.

Получените модели на въртящи се електрически машини и електрозадвижвания са с пряко приложение при изследване и оптимизиране на динамичните характеристики при проектирането (синтеза) им и при изследването и проектирането на системите за управление и на регулаторите на регулируемите електрозадвижвания. Това е в пряка връзка с евентуално прилагане на енергийно-ефективни мерки и определяне с помощта на аналитични техники на възможното енергоспестяване. Разработените и предложени модели могат да се използват освен за анализ и за намиране на решение на обратната задача – разработване на електродвигатели и управляващи системи с параметри, гарантиращи преходни процеси при определени от потребителя изисквания. Това детайлно изучаване на електромагнитните и електромеханичните преходни процеси води до по-рационално и целесъобразно проектиране на електрозадвижвания.

В. АВТОРСКА СПРАВКА ЗА ПРИНОСИТЕ В ДИСЕРТАЦИЯТА

В представената дисертация се разглеждат важни за инженерната практика проблеми, свързани с електромеханичните преходни процеси и

динамични натоварвания при приложни механизми (ковашко-пресови машини и бутални компресори) и техните електрокомпоненти.

Основните научни и научно-приложни приноси могат да бъдат резюмирани в следните няколко пункта:

1. Предложени са нови математически модели, които описват и обединяват взаимодействията в конфигурацията асинхронна електрическа машина – работни машини с ударно натоварване (ковашко-пресови машини и бутални компресори). В получената система от диференциални уравнения за пръв път се отчита факторът хлъзгане на обединената електромеханична система. Този подход е ефективен със своята приложимост.

2. На базата на предния пункт са конструирани алгоритми за прякото практическо приложение на моделите.

3. Избран е различен, подходящ за конкретните задачи софтуер за решаване на системите диференциални уравнения, описващи електромеханичните преходни процеси при различни машини с ударни натоварвания.

4. Създадена е нова методика за определяне на момента и скоростта на асинхронните машини, работещи в динамичен режим, свързан с ковшко-пресови машини и бутални компресори.

5. Получена е картина на различни преходни процеси на ковшко-пресови машини и бутални компресори като функция на параметрите на асинхронната машина и на натоварването, т.е. изследвани са влиянията им върху протичането на преходните процеси. С тяхно участие могат да се усъвършенстват методите за изчисляване на мощността, за избирането и проверката на електродвигателите по загряване и претоварване.

6. Прилагане на методика за определяне са консумираните мощности и загубите на енергия в асинхронните машини по време на преходните процеси, което е в пряка връзка с проектирането на електрозадвижвания за машини с ударно натоварване и избора на електродвигатели и възможностите за подобряване на енергийната ефективност на електрозадвижванията с голям обхват. Прилагайки високоефективни задвижващи системи или подобрявайки съществуващите такива би могло да се спести определено количество електрическа енергия, което би намалило достатъчно необходимостта от генериране на електроенергия и следователно би освободило капитал и ресурси.

7. Получените модели на въртящи се електрически машини и електрозадвижвания са с пряко приложение при изследване и оптимизиране на динамичните характеристики при проектирането (синтеза) им и при

изследването и проектирането на системите за управление и на регулаторите на регулируемите електрозадвижвания. Това е в пряка връзка с евентуално прилагане на енергийно-ефективни мерки и определяне с помощта на аналитични техники на възможното енергоспестяване при работни машини с ударно натоварване. Разработените и предложени модели могат да се използват освен за анализ и за намиране на решение на обратната задача – разработване на електродвигатели и управляващи системи с параметри, гарантиращи преходни процеси при определени от потребителя изисквания. Това детайлно изучаване на електромагнитните и електромеханичните преходни процеси води до по-рационално и целесъобразно проектиране на електрозадвижвания.

8. Наличие на образователен елемент на разработката. Компютърните програми, с помощта на които са проведени изследванията биха могли да намерят пряко приложение в учебния процес по определени дисциплини от учебните планове, с оглед повишаване на качеството му.

Г. СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИЯТА

[A1] Rachev S., K. Karakoulidis, L. Dimitrov. Dynamic Study of Forging Fly-Press driven by Electric Induction Motor. Proceedings of 12th International Conference ‘Research and Development in Mechanical Industry’ RaDMI 2012, Vrnjačka Banja, Serbia, 2012, vol. 2, pp. 1157 – 1164. ISBN 978-86-6075-037-4.

[A2] Рачев С., К. Каракулидис. Определяне на оптимални махови маси при ковашко-пресови машини. Известия на ТУ-Габрово, том 46, 2013, стр. 89 ÷ 93. ISSN 1310-6686.

[A3] Rachev S., K. Karakoulidis. Research on Energy losses in Electric Induction Motor for Forging Fly-Press Drive. Proceedings of XXIInd International Conference ‘Ecological Truth’ EcoIst ‘14, Bor, Serbia, 2014, pp. 131 – 136. ISBN 978-86-6305-021-1.

[A4] Каракулидис К., С. Рачев. Изследване на електрозадвижване с асинхронен двигател за бутален компресор. Proceedings of International Conference on Technics, Technologies and Education ICTTE 2014, Yambol, Bulgaria, 2014, pp. 385 – 392. ISSN 1314-9474.

[A5] Karakoulidis K. Automated Determining the Power Required and Slection of Electric Motors for Reciprocating Compressors. Information, Communication and Control Systems and Technologies, Rouse University ‘Angel Kanchev’, Bulgaria, 2014, ISSN 1314-7455. (приета за печат).

[A6] Karakoulidis K. Automated Determining the Power Required and Selection of Electric Motors for Forging Fly-Press Mechanisms. JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY REVIEW, Eastern Macedonia and Thrace Institute of Technology, Kavala, Greece, Vol. 8, Issue 2, 2015, ISSN:1791-2377. (приета за печат).