

ЕНЕРГИЙНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА АСИНХРОННИ МАШИНИ ЗА ПОДЕМНИ МЕХАНИЗМИ ПРИ ЦИКЛИЧНИ РЕЖИМИ

ENERGY CHARACTERISTICS OF INDUCTION MACHINES DRIVING LIFTING MECHANISMS UNDER CYCLIC MODES

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ МАШИН ДЛЯ ПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ, РАБОТАЮЩИХ В ЦИКЛИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

Assoc. Prof. D.Sc. Vladimirov P.¹
Technical University – Gabrovo, Bulgaria¹

Ass. Prof. Dr. Eng. Spirov D.²
University of Food Technologies – Plovdiv, Bulgaria²

Abstract: A methodology, algorithms and mathematical models for determination of induction machines driving lifting mechanisms energy balances components and losses in two masses of equivalent thermal circuit in case of dynamic and steady-state modes under suspended load lifting and lowering have been developed. The theoretical and experimental investigations results obtained are well-concured comparatively which corroborate the reliability and efficiency of the methodology algorithms and mathematical models developed.

KEYWORDS: ENERGY CHARACTERISTICS, INDUCTION MOTOR, LIFTING MECHANISM, CYCLIC MODES

1. Въведение

Широкото разпространение и голямата инсталирана мощност на електрозадвиженията с асинхронни машини (АМ) за механизми с циклично действие обуславят значителния им дял в общото енергопотребление. Това определя актуалността на задачата за разработване на методика, алгоритми и математически модели за определяне на енергийните характеристики на АМ за механизми с циклично действие при различните динамични и установени режими.

Целесъобразността от използване на коефициента на полезно действие (к.п.д.) η за оценка на енергийната ефективност на системите за електрозадвиждане на механизми с циклично действие е обоснована в [1]. За разглеждания клас механизми той е дефиниран като отношение от сумата на енергиите (механична и електрическа), отдадени от електрическата машина към вала \dot{W} и в електрическата мрежа (съответно в двигателен и спирачен режими) към сумата от енергиите, консумирани от захранващата мрежа и от вала \dot{W} (съответно при двигателен и спирачен режими).

Метод за изчисляване на к.п.д. на системите за електрозадвиждане на механизми с циклично действие в зависимост от параметрите и закона на движение на механизма при отчитане на законите на разпределение на преместванията и натоварванията е разработен в [2].

Компютъризиран метод за определяне на разхода на реактивна енергия на механизми с циклично действие във функция от параметрите на двигателя, механизма и закона на движение при отчитане на особеностите на действителния експлоатационен режим е предложен в [3].

Цел на настоящата работа е да бъдат разработени методика, алгоритми и математически модели за определяне на съставките на енергийните баланси на асинхронни машини за подедни механизми и на загубите в двете тела на еквивалентна топлинна схема при динамични и установени режими на повдигане и спускане на окачен товар.

2. Математически модели

С оглед възможността да се определят загубите на енергия в АМ при динамични и установени режими е удобно да се използват диференциалните уравнения за изобразяващите вектори. Разработването на математическите модели и изследванията се извършват при общоприетите допускания, дадени в [5], като не се отчитат загубите в стоманата.

Известно е, че много АМ работят в повторно кратковременен режим с чести пускания, при което изолацията им е много често застрашена от недопустими прегрявания.

Необходимо е да се разработят алгоритми и математически модели за възможно по-точно пресмятане на температурата на статорната намотка на електродвигателя при зададени товар и параметри на режима.

По принцип са възможни два случая:

а) АМ е изработена. Тя се подлага на изпитване, резултатите от което служат за определяне на загубите \dot{W} и на параметрите на нейната еквивалентна топлинна схема. Съществуват разработки за определяне на параметрите на еквивалентна топлинна схема при които се получава добра съгласуваност между предварително изчисленото прегряване на статорната намотка и полученото при измерване със същите стойности на товар и параметри на режима [4];

б) АМ е още в етап на проектиране или избиране на мощността. Изследванията се провеждат с алгоритми и математически модели, с които трябва да се получат енергийните характеристики на АМ при динамичните и установените режими с достатъчна точност. Параметрите на еквивалентната топлинна схема се определят по изчислителен път [6].

За да определим енергийните характеристики и загубите в двете тела на еквивалентната топлинна схема е необходимо да се състави енергийния баланс на АМ за динамични и установени режими на повдигане и спускане на окачен товар.

Тъй като експериментална проверка на получените с моделите работни и енергийни характеристики на АМ при динамични и при установени режими ще извършваме чрез измерване на електрическите величини за статорната намотка, най-удобно е да използваме неподвижна координатна система α, β , твърдо свързана със статора на машината, а като зависими променливи ще използваме статорният \dot{i}_s и роторният \dot{i}_r токове [5].

а) Повдигане на окачен товар

Енергията, постъпила от мрежата за времето на пускане при повдигане на товар t_{III} е

$$(1) W_{EIII} = \int_0^{t_{III}} p dt = \int_0^{t_{III}} \frac{3}{2} (u_{s\alpha} i_{s\alpha} + u_{s\beta} i_{s\beta}) dt.$$

От тази енергия в движещите се маси постъпва

$$(2) W_{KIII} = \frac{1}{2} J_{\Sigma} \frac{1}{t_{III}} \int_0^{t_{III}} \Omega_r^2 dt,$$

и се извършва полезна работа

$$(3) W_{МПП} = \int_0^{t_{МП}} M\Omega_r dt = \int_0^{t_{МП}} \frac{M\omega_r}{P_p} dt = \frac{3}{2} L_m \int_0^{t_{МП}} (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) \omega_r dt ,$$

където:

$p = \frac{3}{2} (u_{s\alpha} i_{s\alpha} + u_{s\beta} i_{s\beta})$ е моментната стойност на активната мощност;

$M = \frac{3}{2} p_p L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta})$ е електромагнитният момент на електродвигателя;

$\omega_r, \Omega_r = \omega_r / p_p$ са съответно електрическата и механическата ъглови скорости на ротора;

J_M – инерционен момент на АМ;

$J_\Sigma = F I J_M$ – сумарен инерционен момент на машината и на механизма, приведен към вала на машината;

$F I$ – коефициент на инерция;

$v = \Omega_\delta D_\delta / 2 = D_\delta \omega_r / 2 p_p i$ – скорост на движение на товара;

Ω_δ, D_δ – ъглова скорост и диаметър на барабана;

$i = \Omega_r / \Omega_\delta$ – общо предавателно отношение на механизма;

$M_{ТП} = G_\Sigma D_\delta / 2 i$ – съпротивителен момент на товара, приведен към вала на АМ;

$G, G_\theta, G_\Sigma = G + G_\theta$ – тегла, съответно на товара, на товарозахващачото приспособление и общо тегло на товара.

Разликата

$$(4) \Delta W_{ПП} = W_{ЕПП} - (W_{КПП} + W_{МПП})$$

са отделените загуби на енергия в двигателя за времето на пускане при повдигане на окачен товар.

Консумираната енергия от мрежата при установен режим на повдигане на окачен товар е

$$(5) W_{ЕУП} = \int_{t_{МП}}^{t_{УП}} p dt = \int_{t_{МП}}^{t_{УП}} \frac{3}{2} (u_{s\alpha} i_{s\alpha} + u_{s\beta} i_{s\beta}) dt = P_{ЕУП} t_{УП} .$$

Извършената работа при установен режим на повдигане на окачен товар е

$$(6) W_{МУП} = \int_{t_{МП}}^{t_{УП}} M\Omega_r dt = \int_{t_{МП}}^{t_{УП}} \frac{M\omega_r}{P_p} dt = \frac{M_{ТП} \omega_r t_{УП}}{P_p} = P_{МУП} t_{УП} .$$

В горните изрази $P_{ЕУП}$ и $P_{МУП}$ са съответно активната мощност от мрежата и механическата мощност на вала на двигателя при установен режим.

Разликата

$$(7) \Delta W_{УП} = W_{ЕУП} - W_{МУП} = (P_{ЕУП} - P_{МУП}) t_{УП}$$

са отделените загуби на енергия в АМ за времето на работа при установен режим на повдигане на окачен товар.

Общото време за цикъла на повдигане на товара $T_{ЦП}$ е

$$(8) T_{ЦП} = t_{МП} + t_{УП} .$$

Икономичността на работа на електрозадвижването във всеки известен цикъл се характеризира при повдигане на окачен товар с отношението между произведената механична работа $W_{МЕХ.П}$ и консумираната за това време електроенергия $W_{ЕЛ.П}$, наречено к.п.д. за цикъла на повдигане на товара [7].

$$(9) \eta_{ЦП} = \frac{W_{МЕХ.П}}{W_{ЕЛ.П}} = \frac{W_{МПП} + W_{МУП}}{W_{ЕПП} + W_{ЕУП}} .$$

б) Спускане на окачен товар

При преходния процес на пускане при спускане на номинален окачен товар АМ в началото работи в двигателен режим. При достигане на $\omega_r > \omega_s$, електромагнитният момент става отрицателен ($M < 0$) и АМ работи в режим на асинхронен генератор, като преобразува механичната мощност в електрическа мощност, която връща в захранващата мрежа.

- Работа в двигателен режим. Консумираната електроенергия за пускане при спускане на окачен товар и работа в двигателен режим е

$$(10) W_{ЕПСД} = \int_0^{t_{ПСД}} p dt = \int_0^{t_{ПСД}} \frac{3}{2} (u_{s\alpha} i_{s\alpha} + u_{s\beta} i_{s\beta}) dt ,$$

където $t_{ПСД}$ е времето за пускане при работа на машината в двигателен режим ($M\omega_r > 0$).

Механичната енергия при работа в двигателен режим е

$$(11) W_{МПСД} = \int_0^{t_{ПСД}} M\Omega_r dt = \int_0^{t_{ПСД}} \frac{M\omega_r}{P_p} dt = \frac{3}{2} L_m \int_0^{t_{ПСД}} (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) \omega_r dt .$$

- Работа в генераторен режим. Консумираната електроенергия за пускане при спускане на окачен товар и работа в генераторен режим е

$$(12) W_{ЕПСГ} = \int_{t_{ПСД}}^{t_{ПС}} p dt = \int_{t_{ПСД}}^{t_{ПС}} \frac{3}{2} (u_{s\alpha} i_{s\alpha} + u_{s\beta} i_{s\beta}) dt ,$$

където $t_{ПС} = t_{ПСД} + t_{ПСГ}$ е времето за пускане при спускане, а $t_{ПСГ}$ е времето за пускане при работа на машината в генераторен режим ($M\omega_r < 0$).

Механичната енергия при работа в генераторен режим е

$$(13) W_{МПСГ} = \int_{t_{ПСД}}^{t_{ПС}} M\Omega_r dt = \int_{t_{ПСД}}^{t_{ПС}} \frac{M\omega_r}{P_p} dt = \frac{3}{2} L_m \int_{t_{ПСД}}^{t_{ПС}} (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) \omega_r dt .$$

От тази енергия в движещите се маси постъпва

$$(14) W_{КПС} = \frac{1}{2} J_\Sigma \frac{1}{t_{ПС}} \int_0^{t_{ПС}} \Omega_r^2 .$$

Разликата

$$(15) \Delta W_{ПС} = W_{ЕПСД} + W_{МПСГ} - (W_{КПС} + W_{МПСД} + W_{ЕПСГ}) .$$

са отделените загуби на енергия в двигателя за времето на пускане при спускане на окачен товар.

Механическата работа при установен режим на спускане на окачен товар е

$$(16) W_{МУС} = \int_{t_{ПС}}^{t_{УС}} M\Omega_r dt = \int_{t_{ПС}}^{t_{УС}} \frac{M\omega_r}{P_p} dt = \frac{M_{ТС} \omega_r t_{УС}}{P_p} = P_{МУС} t_{УС} .$$

Електрическата енергия, върната в мрежата при установен режим на спускане на окачен товар е

$$(17) W_{ЕУС} = \int_{t_{ПС}}^{t_{УС}} p dt = \int_{t_{ПС}}^{t_{УС}} \frac{3}{2} (u_{s\alpha} i_{s\alpha} + u_{s\beta} i_{s\beta}) dt = P_{ЕУС} t_{УС} .$$

В горните изрази $P_{МУС}$ и $P_{ЕУС}$ са съответно механическата мощност на вала на двигателя и активната мощност, върната в електрическата мрежа при установен режим.

Разликата

$$(18) \Delta W_{УС} = W_{МУС} - W_{ЕУС} = (P_{МУС} - P_{ЕУС}) t_{УС}$$

са отделените загуби на енергия в АМ за времето на работа при установен режим на спускане на окачен товар.

Общото време за цикъла на повдигане на товара $T_{ЦС}$ е

$$(19) T_{ЦС} = t_{ПС} + t_{УС} .$$

Икономичността на работа на електрозадвижването се характеризира при спускане на окачен товар с отношението между върнатата в електрическата мрежа електроенергия $W_{ЕЛ.С}$ и използваната механична енергия на товара $W_{МЕХ.С}$, наречено к.п.д. на спускане на товара [7].

$$(20) \eta_C = \frac{W_{ЕЛ.С}}{W_{МЕХ.С}} = \frac{W_{ЕПСГ} + W_{ЕУС}}{W_{МПСГ} + W_{МУС}} .$$

Ако отчетем работата на електродвигателя в двигателен режим при спускане на окачен товар, при който двигателя консумира електрическа енергия $W_{ЕПСД}$ и отдава на механизма механична енергия $W_{МПСД}$ за времето $t_{ПСД}$, к.п.д. за целия цикъл на работа се получава

$$(21) \eta_{ЦС} = \frac{W_{МПСД} + W_{ЕПСГ} + W_{ЕУС}}{W_{ЕПСД} + W_{МПСГ} + W_{МУС}} .$$

в) Определяне на загубите в двете тела на еквивалентната топлинна схема

За определяне на температурата на най-горещата част на статорната намотка е подходяща еквивалентна топлинна схема с две условно еднородни тела – челните съединения на намотката (които при този тип двигатели са именно най-горещата част) и всички останали части. Ще приемем последните да се наричат „фиктивно тяло” [4]. За да се определят средните стойности на загубите в тези две тела, е необходимо да се състави енергийният баланс на АМ за всички динамични и установени режими.

За времето на пускане при повдигане на окачен товар в челните съединения на АМ се отделят загуби [6]

$$(22) \Delta W_{\text{чПП}} = \frac{3}{2} R_s \frac{l_c}{l_w} \int_0^{t_{\text{ПП}}} (i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2) dt,$$

а във фиктивното тяло се отделят загуби

$$(23) \Delta W_{\text{фПП}} = \Delta W_{\text{ПП}} - \Delta W_{\text{чПП}},$$

където l_c е дължината на челните съединения, а l_w – дължината на цялата навивка.

За времето на установения режим при повдигане на окачен товар в челните съединения на АМ се отделят загуби

$$(24) \Delta W_{\text{чУП}} = \frac{3}{2} R_s \frac{l_c}{l_w} \int_{t_{\text{ПП}}}^{t_{\text{УП}}} (i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2) dt,$$

а във фиктивното тяло се отделят загуби

$$(25) \Delta W_{\text{фУП}} = \Delta W_{\text{УП}} - \Delta W_{\text{чУП}}.$$

За времето на пускане при спускане на окачен товар в челните съединения на АМ се отделят загуби

$$(26) \Delta W_{\text{чПС}} = \frac{3}{2} R_s \frac{l_c}{l_w} \int_0^{t_{\text{ПС}}} (i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2) dt,$$

а във фиктивното тяло се отделят загуби

$$(27) \Delta W_{\text{фПС}} = \Delta W_{\text{ПС}} - \Delta W_{\text{чПС}},$$

За времето на установения режим при спускане на окачен товар в челните съединения на АМ се отделят загуби

$$(28) \Delta W_{\text{чУС}} = \frac{3}{2} R_s \frac{l_c}{l_w} \int_{t_{\text{ПС}}}^{t_{\text{УС}}} (i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2) dt,$$

Таблица 1. Стойности на величините при повдигане на номинален окачен товар

Величини	$t_{\text{ПП}}$	$W_{\text{ЕПП}}$	$W_{\text{КПП}}$	$W_{\text{МПП}}$	$\Delta W_{\text{ПП}}$	$\Delta W_{\text{чПП}}$	$\Delta W_{\text{фПП}}$
Дименсии	s	Ws	Ws	Ws	Ws	Ws	Ws
Измерени	0,189	2311,33	128,51	855,91	1347,32	185,06	1164,48
Изчислени	0,180	2446,31	119,85	853,58	1472,89	193,83	1279,06
$\epsilon, \%$	4,71	-5,84	6,74	3,65	-9,32	-4,74	-9,84

Таблица 1. Продължение

Величини	$t_{\text{УП}}$	$W_{\text{ЕУП}}$	$W_{\text{МУП}}$	$\Delta W_{\text{УП}}$	$\Delta W_{\text{чУП}}$	$\Delta W_{\text{фУП}}$	$\eta_{\text{ПП}}$
Дименсии	s	$Ws \cdot 10^3$	$Ws \cdot 10^3$	$Ws \cdot 10^3$	$Ws \cdot 10^3$	$Ws \cdot 10^3$	-
Измерени	78,341	480,95	404,63	75,39	11,81	63,53	0,813
Изчислени	81,114	474,56	393,18	81,37	11,66	69,71	0,826
$\epsilon, \%$	-3,54	1,33	2,83	-7,94	1,21	-9,73	-1,56

б) Спускане на номинален окачен товар

При спускане с подемния механизъм на въжения електротелфер на номинален товар G_{Σ} за приведения съпротивителен момент на вала на електродвигателя се получава [5]:

Таблица 2. Стойности на величините при спускане на номинален окачен товар

Величини	$t_{\text{ПСД}}$	$t_{\text{ПС}}$	$W_{\text{ЕПСД}}$	$W_{\text{ЕПСГ}}$	$W_{\text{МПСД}}$
Дименсии	s	s	Ws	Ws	Ws
Измерени	0,059	0,236	783,27	814,95	168,39
Изчислени	0,057	0,225	843,03	771,51	164,46
$\epsilon, \%$	2,67	4,54	-7,63	5,33	2,33

а във фиктивното тяло се отделят загуби

$$(29) \Delta W_{\text{фУС}} = \Delta W_{\text{УС}} - \Delta W_{\text{чУС}}.$$

3. Получени резултати

Теоретични изследвания с разработените алгоритми и математически модели и експериментални изследвания за енергийните характеристики при динамични и установени режими бяха проведени с асинхронен електродвигател тип КГ 2011-6, задвижващ подемния механизъм на въжен електротелфер с номинална товароподемност $32kN$ и скорост на подема $8m/min$ при издигане и при спускане на номинален окачен товар. Сумарният инерционен момент на електродвигателя и на механизма, приведен към вала на електродвигателя е $J_{\Sigma}=0,06263kgm^2$.

Техническите данни на електродвигателя са дадени в Приложение 1, а параметрите на заместващата схема – в Приложение 2. За изследвания електродвигател $l_w=0,446m$, а $l_c=0,110m$.

Ще изследваме характеристиките на подемния механизъм при височина на повдигане и на спускане $h=12m$.

Измерванията се извършват с компютърно-базирана система за усвояване на данни, която съдържа DAQ измервателна компютърна платка и приложен софтуер за графично програмиране LabVIEW® (National Instruments Corporation) [5]. Резултатите от теоретичните и експерименталните изследвания са систематизирани в съответните таблици и е изчислена относителната грешка.

а) Повдигане на номинален окачен товар

При повдигане с подемния механизъм на въжения електротелфер номинален товар $32kN$ приведеният съпротивителен момент на вала на електродвигателя се получава [5]:

$$(30) M_{\text{ПП}} = \frac{G_{\Sigma} D_6}{2i\eta_H} = \frac{32 \cdot 10^3 \cdot 0,29}{2 \cdot 2,95 \cdot 2,0 \cdot 0,97} = 50,3Nm$$

където $G_{\Sigma}=32kN$; $D_6=0,29m$ – диаметър на барабана; $i=i' \cdot u=2 \cdot 47,6=95,2$ – общо предавателно отношение; $i'=47,6$ – предавателно отношение на редуктора; $u=2$ – предавателно отношение на полиспада; $\eta_H=0,97$ – номинален к.п.д. на подемния механизъм.

$$(31) M_{\text{ТС}} = \frac{G_{\Sigma} D_6 \eta'_H}{2i} = 47,23Nm$$

където: $\eta'_H=2-1/\eta_H=0,969$.

Таблица 2. Продължение

Величини	$W_{МПСГ}$	$W_{КПС}$	$\Delta W_{ПС}$	$\Delta W_{ЧПС}$	$\Delta W_{ФПС}$
Дименсии	Ws	Ws	Ws	Ws	Ws
Измерени	893,44	318,56	462,42	91,07	330,79
Изчислени	910,78	303,36	430,84	93,55	337,28
$\epsilon, \%$	-1,94	4,77	6,83	-2,73	-1,96

Таблица 2. Продължение

Величини	t_{YC}	W_{EVC}	W_{MVC}	ΔW_{VC}	$\Delta W_{ЧVC}$	$\Delta W_{ФVC}$	η_C	η_{CC}
Дименсии	s	$Ws.10^3$	$Ws.10^3$	$Ws.10^3$	$Ws.10^3$	$Ws.10^3$	-	-
Измерени	70,67	298,19	398,36	56,94	7,99	43,46	0,790	0,788
Изчислени	69,44	309,64	363,94	54,30	8,34	45,96	0,851	0,849
$\epsilon, \%$	1,74	-3,84	8,64	4,65	-4,32	-5,74	-7,69	-7,74

От направените експериментални изследвания се вижда, че връщаната в електрическата мрежа електроенергия при спускане на номинален окачен товар е $W_{EЛC}=299,01.10^3Ws$ и представлява $W_{EЛC.100}/W_{EЛ.П}=299,01.10^3/477,01.10^3=61,872\%$ от консумираната електроенергия при издигане на номинален окачен товар $W_{EЛ.П}=483,26.10^3Ws$. Затова при избора на системата на електрозадвигване на подемните механизми е необходимо тя да позволява връщане на електроенергия в мрежата.

4. Заключение

Разработени са методика, алгоритми и математически модели позволяват да се изследват енергийните характеристики и енергийната ефективност на асинхронни машини и електрозадвигвания за подемни механизми при динамични и при установени режими още на етапа на проектиране и избиране на АМ. Те позволяват да се изследват влиянията на параметрите на АМ и на механизма и на режимите на работа и натоварване върху енергийната им ефективност и да проверяват по загряване и кратковременно претоварване.

Определянето на загубите в двете условно еднородни тела на еквивалентната топлинна заместваща схема на АМ позволява тя да бъде съставена и с нея да се изследва загряването ѝ при различни динамични и установени режими и натоварвания.

5. Приложение 1

Технически данни и параметри на асинхронен електродвигател тип КГ 2011-6

$$P_N=4,5kW; U_N=380V; I_N=15,0A; f=50Hz; p_p=3; n_N=920min^{-1}; s_N=0,08; I_{II}/I_N=2,8; M_{II}/M_N=1,9; J_M=0,0458kgm^2.$$

6. Приложение 2

Параметри за хлъзгане $s=1$

$$R_s=1,359\Omega; R_r=1,638\Omega; X_{\sigma s}=1,639\Omega; X_{\sigma r}=2,213\Omega; X_m=31,96\Omega.$$

Параметри за хлъзгане $s=0,08$

$$R_s=1,359\Omega; R_r=1,593\Omega; X_{\sigma s}=2,233\Omega; X_{\sigma r}=3,575\Omega; X_m=31,96\Omega.$$

7. Литература

- [1]. Йорданов, С., Г. Даскалов. Проблеми за оценката на енергийните показатели на механизми с циклично действие. Научна конференция на ТУ-Габрово, 1995, том III, стр. 260-265.
- [2]. Йорданов С., Г. Даскалов, К. Кутрянски. Метод за изчисляване на к.п.д. на системите за електрозадвигване на механизми с циклично действие, „Електротехника и електроника”, 1996, № 9-10, стр. 3-6.
- [3]. Даскалов Г. А., Определяне на разхода на реактивна енергия на механизми с циклично действие, „Електротехника и електроника”, 1997, № 9-10, стр. 14-17.
- [4]. Петров, Т., Д. Марков, Т. Илиев. Моделиране на топлинните процеси в електродвигатели за въжени електротелфери. „Техн. мисъл”, Година XXV, 1988, №5.
- [5]. Владимирова, П. Динамични режими и натоварвания, енергийни характеристики и избиране мощността на асинхронни машини. Дисертация за получаване на научната степен “Доктор на техническите науки”. Габрово, 2007.
- [6]. Vladimirov P., T. Petrov, S. Ratshev. Bestimmung der energieverluste bei den asynchronmaschinen, die hubwerke antreiben. 13th Internationale Wissenschaftliche Konferenz Mittweida, Mittweida, BRD, 11-14 XI 1998.
- [7]. Ключев, В. Теория на електрозадвигването. София, Техника, 1989, 544 с.
- [8]. Владимирова, П., С. Рачев, Д. Спиров. Определяне на работните и енергийните характеристики на асинхронни машини при динамични и установени режими при спускане на окачен товар. „Енергетика”, №6, 2006, стр. 23-28.