

Определяне на съставките на загубите в асинхронна машина при честотно управление

Пенчо Владимирова

Determination of the losses components in induction machine with frequency control: An algorithms and mathematical models for determination of the losses components in induction machine with frequency control have been developed under constant resisting moment and power in case of magnetic field depression and fan blower dependence of resisting moment toward the speed. Dependences of the induction machine losses components for oftentimes utilized frequency control laws have been obtained by means of the models

Keywords: induction machine, frequency control, losses components

ВЪВЕДЕНИЕ

Като по-важни предимства на честотното управление пред останалите методи за управление на асинхронни електродвигатели, могат да се изтъкнат: а). високи енергетични показатели; б). широк диапазон на регулиране на скоростта, както под, така и над номиналната и стойност; в). добра твърдост на механичните характеристики; г). висока претоварваща способност.

В практиката често се налага да се определят загубите в АМ при динамични и при установени режими поради различни причини – определяне на загряването на намотката, избиране на мощността на машините и проверката им по условията на загряването, косвени методи за определяне на к.п.д. на машините, оценка на енергийната ефективност на асинхронните машини и задвижвания, реализиране на енергоикономично регулиране на честотата на въртене на асинхронните задвижвания и др.

За определяне на загубите в асинхронна машина (АМ) при динамични и установени режими е удобно да се използва функцията на загубите [1]. Методика, алгоритми и математически модели за определяне на функцията на загубите на АМ при динамични и установени режими в реално време с използване на диференциалните уравнения за изобразяващите вектори е разработена в [1].

Цел на настоящата работа е да се разработят алгоритми и математически модели за определяне на съставките на загубите в асинхронна машина при честотно управление при константни съпротивителен момент и мощност, при отслабване на магнитното поле и при вентилаторна зависимост на съпротивителният момент.

МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛИ

Загубите в АМ при динамични и установени режими се определят с функцията на загубите [1]

$$\Sigma p = p_{en1} + p_{c1} + p_{en2} + p_{c2} + p_{мех} + p_{доп} \quad (1)$$

където: p_{en1} , p_{en2} – електрически загуби в активните съпротивления, съответно на намотките на статора и на ротора;

p_{c1} , p_{c2} – загубите в стоманите, съответно на статора и на ротора;

$p_{мех}$ – механични загуби;

$p_{доп}$ – допълнителни загуби.

Съставките на функцията на загубите при него се определят от изразите [1]

$$\begin{aligned} p_{en1} &= 3/2R_s(i_{su}^2 + i_{sv}^2) = 3/2R_s i_s^2; & p_{c1} &= 3/2R_{ss}(i_{ssu}^2 + i_{ssv}^2) = 3/2R_{ss} i_{ss}^2; \\ p_{en2} &= 3/2R_r(i_{ru}^2 + i_{rv}^2) = 3/2R_r i_r^2; & p_{c2} &= 3/2R_{rs}(i_{rsu}^2 + i_{rsv}^2) = 3/2R_{rs} i_{rs}^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Както е известно, механичните загуби на АМ се определят от израза

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{мех}0} \cdot (1-s)^2 = P_{\text{мех}0} \cdot \left(\frac{\omega_r}{\omega_s} \right)^2 \quad (3)$$

където $P_{\text{мех}0}$ са механичните загуби на празен ход.

От проведените в [1] изследвания се вижда, че загубите в стоманата на ротора P_{c2} се проявяват в началото на преходния процес за много кратко време и след това са много малки и могат да се пренебрегнат. По тази причина при разработката на модела те се пренебрегват. След заместване във функцията на загубите на изразите за съставките $P_{\text{еп}1}$, $P_{\text{еп}2}$ и $P_{\text{доп}}$ се получава

$$\Sigma P = \frac{3}{2} R_s i_s^2 + \frac{3}{2} R_r i_r^2 + P_{c1} + P_{\text{мех}} + R_{\text{доп}} i_s^2, \quad (4)$$

където:

- R_s , R_r са активни съпротивления, съответно на фаза от статора и ротора;
- $R_{\text{доп}}$ – еквивалентно активно съпротивление, отчитащо допълнителните загуби.

Ако искаме АМ при честотно управление да работи с практически постоянни стойности на к.п.д., на фактора на мощността, на претоварващата способност и с постоянно абсолютно хлъзгане при ненаситена магнитна верига е необходимо едновременно с изменение на честотата да се регулира също напрежението U_s в зависимост от честотата и момента по следният закон [2]

$$\frac{U_{S2}}{U_{S1}} = \frac{f_{S2}}{f_{S1}} = \sqrt{\frac{M_{c2}}{M_{c1}}} \quad (5)$$

където:

M_{c1} и M_{c2} са статичните съпротивителни моменти за скорости на двигателя съответно при честоти f_{S1} и f_{S2} ;

U_{S1} и U_{S2} – захранващи напрежения на асинхронната машина съответно при честоти f_{S1} и f_{S2} ;

За да можем да използваме моделите за определяне на $P_{\text{еп}1}$, $P_{\text{еп}2}$ и P_{c1} при честотно регулиране е необходимо да ги преобразуваме така, че да се отчитат измененията им, при измененията на захранващите напрежения и честоти и на характера и големината на статичния съпротивителен момент. За целта е удобно променящите се величини да се представят като кратности спрямо номиналните им стойности:

$$k_U = \frac{U_s}{U_{SN}}, \quad k_f = \frac{f_s}{f_{SN}}, \quad m = \frac{M_s}{M_{SN}} \quad (6)$$

При промяна на захранващата честота индуктивните съпротивления X_{sf} , X_{rf} и X_{mf} могат да се представят във вида:

$$\begin{aligned} x_{sf} &= \omega \cdot (L_{\sigma s} + L_m) = 2\pi \cdot f_s \cdot (L_{\sigma s} + L_m) = k_f \cdot x_s; \\ x_{rf} &= \omega \cdot (L_{\sigma r} + L_m) = 2\pi \cdot f_s \cdot (L_{\sigma r} + L_m) = k_f \cdot x_r; \\ x_{mf} &= \omega \cdot L_m = 2\pi \cdot f_s \cdot L_m = k_f \cdot x_m, \end{aligned} \quad (7)$$

където x_s , x_r и x_m са индуктивните съпротивления при честота f_{SN} ;

Приемаме, че при различни по големина натоварвания, моменти и скорости работим в линейната част на механичната характеристика и хлъзганята, при които ще работи електродвигателят ще определяме от израза:

$$s = s_N \cdot \frac{M}{M_N}, \quad (8)$$

където:

M_N , s_N – са номиналните момент и хлъзгане;

M , s – текущите стойности за момента и хлъзгането.

Тогава за съставките на загубите при промяна на захранващото напрежение и честота и големините на натоварването M и хлъзгането s получаваме:

$$P_{en1} = \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot \frac{k_U^2 \cdot U_{SN}^2 \cdot \left[\left(\frac{R_r}{s} \right)^2 + k_f^2 \cdot x_r^2 \right]}{\left(R_s \cdot \frac{R_r}{s} - k_f^2 \cdot x_s \cdot x_r + k_f^2 \cdot x_m^2 \right)^2 + \left(R_s \cdot k_f \cdot x_r + \frac{R_r}{s} \cdot k_f \cdot x_s \right)^2}; \quad (9)$$

$$P_{en2} = \frac{3}{2} \cdot R_r \cdot \frac{k_U^2 \cdot U_{SN}^2 \cdot k_f^2 \cdot x_s^2}{\left(R_s \cdot \frac{R_r}{s} - k_f^2 \cdot x_s \cdot x_r + k_f^2 \cdot x_m^2 \right)^2 + \left(R_s \cdot k_f \cdot x_r + \frac{R_r}{s} \cdot k_f \cdot x_s \right)^2}. \quad (10)$$

При честотно регулиране с постоянен момент на вала съгласно (5) законът за регулиране на захранващите напрежение и честота е:

$$\frac{U_s}{f_s} = const. \quad (11)$$

С известно приближение може да се напише

$$U_s \approx \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f_s \cdot \omega_s \cdot K_{\omega s} \cdot \Phi. \quad (12)$$

Следователно $U_s/f_s \approx \Phi$. Така че, ако се спази условието (11), основният магнитен поток Φ и насищането на магнитната верига се запазват приблизително постоянни при широко изменение на честотата на въртене на асинхронния двигател.

За номинален режим получаваме:

$$\frac{U_{SN}}{f_{SN}} = const; \quad \frac{k_U \cdot U_{SN}}{k_f \cdot f_{SN}} = const = \frac{U_{SN}}{f_{SN}}; \quad \frac{k_U}{k_f} = 1. \quad (13)$$

За тези случаи коефициентите k_U и k_f ще бъдат равни $k_U = k_f$.

При голямо намаляване на честотата ($f_s = 5 \div 10 \text{ Hz}$) нараства влиянието на активното съпротивление на първичната намотка и регулирането на n съгласно (5) не позволява да се запази на необходимото ниво коефициентът на мощността $\cos\varphi$ и претоварващата способност на двигателя. С оглед да се отстрани този недостатък се използва модифициран закон за изменение на напрежението, в който се задава минимална стойност на напрежението, компенсираща пада на напрежение в активното съпротивление на статорната намотка:

$$\Delta U = I_N \cdot R_s. \quad (14)$$

За съставките на загубите p_{en1} и p_{en2} получаваме:

$$P_{en1} = \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot \frac{k_f^2 \cdot U_{SN}^2 \cdot \left[\left(\frac{R_r}{s} \right)^2 + k_f^2 \cdot x_r^2 \right]}{\left(R_s \cdot \frac{R_r}{s} - k_f^2 \cdot x_s \cdot x_r + k_f^2 \cdot x_m^2 \right)^2 + \left(R_s \cdot k_f \cdot x_r + \frac{R_r}{s} \cdot k_f \cdot x_s \right)^2}; \quad (15)$$

$$P_{en2} = \frac{3}{2} \cdot R_r \cdot \frac{k_f^2 \cdot U_{SN}^2 \cdot k_f^2 \cdot x_s^2}{\left(R_s \cdot \frac{R_r}{s} - k_f^2 \cdot x_s \cdot x_r + k_f^2 \cdot x_m^2 \right)^2 + \left(R_s \cdot k_f \cdot x_r + \frac{R_r}{s} \cdot k_f \cdot x_s \right)^2}. \quad (16)$$

При регулиране на напрежението съгласно израза $U_s \approx \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f_s \cdot \omega_s \cdot K_{\omega s} \cdot \Phi$, $\Phi \approx U_s/f_s \approx const$, магнитната индукция $B = const$ и загубите в стоманата могат да се намерят с израза:

$$P_{CT} = \kappa_D \cdot P_{1/50} \cdot \left(\frac{B_N}{1} \right)^2 \cdot \left(\frac{k_f f_{SN}}{50} \right)^{1.3} \cdot G_{CT} = P_{cm.N} \cdot k_f^{1.3}, \quad (17)$$

където $p_{cm.N} = \kappa_D \cdot p_{1/50} \cdot \left(\frac{B_N}{1}\right)^2 \cdot \left(\frac{f_{SN}}{50}\right)^{1,3} \cdot G_{CT}$ са загубите в стоманата на статора при номинален режим.

При честотно регулиране с постоянна мощност съгласно (5) законът за регулиране на захранващите напрежение и честота е:

$$\frac{U_s^2}{f_s} = const. \quad (18)$$

За номинален режим $U_{SN}^2/f_{SN} = const.$

За регулираните стойности на напрежението и честотата се получава:

$$\frac{k_U^2 \cdot U_{SN}^2}{k_f \cdot f_{SN}} = const = \frac{U_{SN}^2}{f_{SN}}; \quad (19)$$

$$\frac{k_U^2}{k_f} = 1, k_U^2 = k_f, k_U = \sqrt{k_f}. \quad (20)$$

Следователно изразите за p_{en1} и p_{en2} придобиват следния вид:

$$p_{en1} = \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot \frac{k_f \cdot U_{SN}^2 \cdot \left[\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + k_f^2 \cdot x_r^2 \right]}{\left(R_s \cdot \frac{R_r}{s} - k_f^2 \cdot x_s \cdot x_r + k_f^2 \cdot x_m^2 \right)^2 + \left(R_s \cdot k_f \cdot x_r + \frac{R_r}{s} \cdot k_f \cdot x_s \right)^2}; \quad (21)$$

$$p_{en2} = \frac{3}{2} \cdot R_r \cdot \frac{k_f \cdot U_{SN}^2 \cdot k_f^2 \cdot x_s^2}{\left(R_s \cdot \frac{R_r}{s} - k_f^2 \cdot x_s \cdot x_r + k_f^2 \cdot x_m^2 \right)^2 + \left(R_s \cdot k_f \cdot x_r + \frac{R_r}{s} \cdot k_f \cdot x_s \right)^2} \quad (22)$$

За магнитната индукция при номинален режим B_N се получава:

$$B_N = \frac{U_{SN}}{4,44 \cdot f_{SN} \cdot w_s \cdot k_{WS}},$$

а за текущата стойност на B при регулирането се получава:

$$B = \frac{k_U \cdot U_{SN}}{4,44 \cdot k_f \cdot f_{SN} \cdot w_s \cdot k_{WS}} = \frac{k_U}{k_f} \cdot B_N. \quad (23)$$

Загубите в стоманата на статора се определят от израза:

$$p_{C1} = \kappa_D \cdot p_{1/50} \cdot \left(\frac{k_U}{k_f} \cdot B_N\right)^2 \cdot \left(\frac{k_f \cdot f_{SN}}{50}\right)^{1,3} \cdot G_{CT} = p_{cm.N} \cdot \frac{k_U^2}{k_f^2} \cdot k_f^{1,3} = p_{cm.N} \cdot \frac{k_f}{k_f^2} \cdot k_f^{1,3} = p_{cm.N} \cdot k_f^{0,3}. \quad (24)$$

Асинхронните двигатели за главни задвижвания на металорежещи машини с ЦПУ работят във втората зона на скоростта в режим на регулиране с постоянна полезна мощност. Тъй като полезната мощност $P=2\pi \cdot f_s \cdot M$, за да се осъществи

$P=const$ е необходимо $\frac{U_{S2}}{U_{S1}} = \sqrt{\frac{f_{S2}}{f_{S1}}}$, и да се използва закон за регулиране на захранващите напрежение и ток:

$$\frac{U_s^2}{f_s} = const. \quad (25)$$

С оглед намаляване на загубите в стоманата на статора във втората зона регулирането на честотата ще се извършва при запазване на захранващото напрежение $U_s=U_{SN}=const$. Поради това $k_U=U_s/U_{SN}=1$, а $k_f=f_s/f_{SN}$.

Съгласно изразите за p_{en1} и p_{en2} придобиват следния вид:

$$p_{en1} = \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot \frac{U_{SN}^2 \cdot \left[\left(\frac{R_r}{s} \right)^2 + k_f^2 \cdot x_r^2 \right]}{\left(R_s \cdot \frac{R_r}{s} - k_f^2 \cdot x_s \cdot x_r + k_f^2 \cdot x_m^2 \right)^2 + \left(R_s \cdot k_f \cdot x_r + \frac{R_r}{s} \cdot k_f \cdot x_s \right)^2}; \quad (26)$$

$$p_{en2} = \frac{3}{2} \cdot R_r \cdot \frac{U_{SN}^2 \cdot k_f^2 \cdot x_s^2}{\left(R_s \cdot \frac{R_r}{s} - k_f^2 \cdot x_s \cdot x_r + k_f^2 \cdot x_m^2 \right)^2 + \left(R_s \cdot k_f \cdot x_r + \frac{R_r}{s} \cdot k_f \cdot x_s \right)^2}. \quad (27)$$

За магнитната индукция B в магнитната система при регулирането получаваме:

$$B = \frac{k_U \cdot U_{SN}}{4,44 \cdot k_f \cdot f_{SN} \cdot w_s \cdot k_{WS}} = \frac{1}{k_f} \cdot B_N. \quad (28)$$

С увеличаване на честотата магнитната индукция ще намалява, като ще се реализира отслабване на магнитното поле. Загубите в стоманата на статора в този случай се определят от израза:

$$P_{C1} = \kappa_D \cdot P_{1/50} \left(\frac{B_N}{k_f} \right)^2 \cdot \left(\frac{k_f f_{SN}}{50} \right)^{1,3} \cdot G_{CT} = P_{cm.N} \cdot \frac{1}{k_f^2} \cdot k_f^{1,3} = P_{cm.N} \cdot k_f^{-0,7}. \quad (29)$$

При честотно регулиране когато $M \approx n_1^2 \approx f_s^2$ съгласно (5) законът на регулиране на захранващите напрежение и честота е:

$$\frac{U_s}{f_s^2} = const. \quad (30)$$

За номинален режим $U_{SN}/f_{SN}^2 = const$.

За регулираните стойности на напрежението и на честотата се получава:

$$\frac{k_U \cdot U_{SN}}{k_f^2 \cdot f_{SN}^2} = const = \frac{U_{SN}}{f_{SN}^2}; \quad (31)$$

$$\frac{k_U}{k_f^2} = 1, k_U = k_f^2 \quad (32)$$

За съставките на загубите p_{en1} и p_{en2} получаваме:

$$p_{en1} = \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot \frac{k_f^4 \cdot U_{SN}^2 \cdot \left[\left(\frac{R_r}{s} \right)^2 + k_f^2 \cdot x_r^2 \right]}{\left(R_s \cdot \frac{R_r}{s} - k_f^2 \cdot x_s \cdot x_r + k_f^2 \cdot x_m^2 \right)^2 + \left(R_s \cdot k_f \cdot x_r + \frac{R_r}{s} \cdot k_f \cdot x_s \right)^2}; \quad (33)$$

$$p_{en2} = \frac{3}{2} \cdot R_r \cdot \frac{k_f^4 \cdot U_{SN}^2 \cdot k_f^2 \cdot x_s^2}{\left(R_s \cdot \frac{R_r}{s} - k_f^2 \cdot x_s \cdot x_r + k_f^2 \cdot x_m^2 \right)^2 + \left(R_s \cdot k_f \cdot x_r + \frac{R_r}{s} \cdot k_f \cdot x_s \right)^2}. \quad (34)$$

За магнитната индукция при номинален режим се получава: $B = \frac{U_{SN}}{4,44 \cdot f_{SN} \cdot w_s \cdot k_{WS}}$,

а за текущата стойност на B при регулирането се получава:

$$B = \frac{k_U \cdot U_{SN}}{4,44 \cdot k_f \cdot f_{SN} \cdot w_s \cdot k_{WS}} = \frac{k_U}{k_f} \cdot B_N = \frac{k_f^2}{k_f} \cdot B_N = k_f \cdot B_N. \quad (35)$$

Загубите в стоманата се определят :

$$P_{C1} = \kappa_D \cdot P_{1/50} \cdot (k_f \cdot B_N)^2 \cdot \left(\frac{k_f f_{SN}}{50} \right)^{1,3} \cdot G_{CT} = \kappa_D \cdot P_{1/50} \cdot (B_N)^2 \cdot \left(\frac{f_{SN}}{50} \right)^{1,3} \cdot G_{CT} \cdot k_f^2 \cdot k_f^{1,3} = P_{cm.N} \cdot k_f^{3,3} \quad (36)$$

ПОЛУЧЕНИ РЕЗУЛТАТИ

Определянето на съставките на загубите на асинхронна машина ще извършим за предназначения за честотно регулиране асинхронен двигател T112 M2 BR/B14 с номинални данни:

$$P_H = 5kW, p = 1, n_n = 2827,4 \text{ min}^{-1}$$

$$M_H = 16.89N.m, s_n = 0,0575$$

$$U_{\phi n} = 220V, f_n = 50Hz, I_{1\phi n} = 9,786A$$

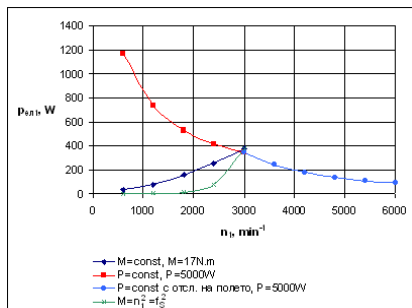
Параметрите на заместващата схема на двигателя са определени по изчислителна методика за хлъзгане $s_N = 0,0575$ и имат следните стойности:

$$R_S = 1,35\Omega; R_r = 1,25\Omega \quad x_{\sigma 1} = 2,16\Omega; x_{\sigma 2} = 2,21\Omega; x_m = 87,9\Omega$$

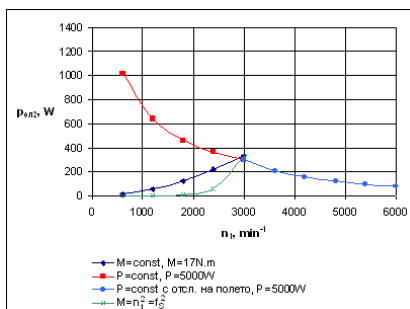
$$x_S = x_{\sigma 1} + x_m = 2,16 + 87,9 = 90,06\Omega; x_r = x_{\sigma 2} + x_m = 2,21 + 87,9 = 90,11\Omega$$

$$p_{ел.1N} = 387W, p_{ел.2N} = 314W, p_{cm} = 83W$$

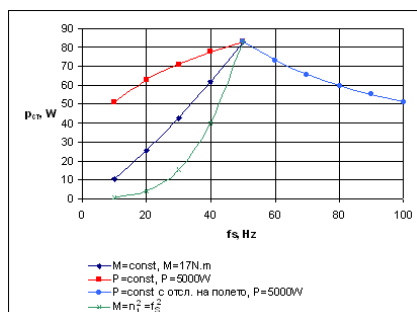
Във връзка с избирането на подходящ закон на регулиране на асинхронните задвижвания представлява интерес изменението на загубите при различните закони на честотно регулиране. За тази цел са предложени графически зависимости на съставките на загубите при различните закони на честотно регулиране на съответните фигури.



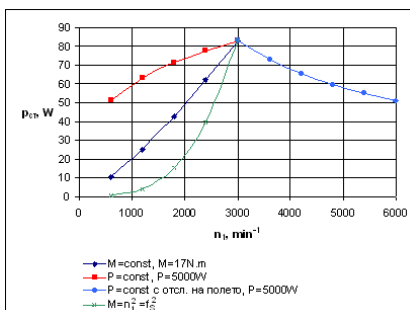
фиг.1. Зависимост на загубите $p_{ел.1}$ от честотата на въртене n_1



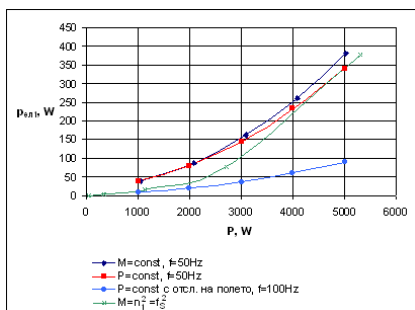
фиг.2. Зависимост на загубите $p_{ел.2}$ от честотата на въртене n_1



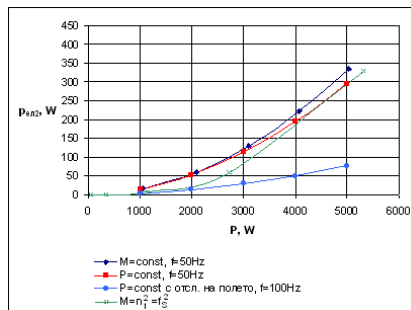
фиг.3. Зависимост на загубите $p_{ел.2}$ от честотата f_S



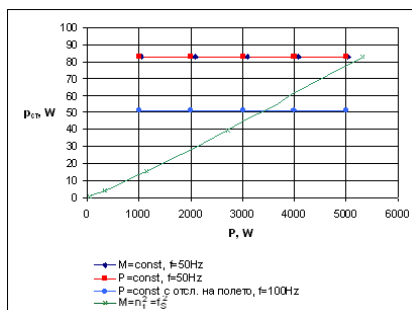
фиг.4. Зависимост на загубите p_{cm} от честотата на въртене n_1



фиг.5.Зависимост на загубите $p_{ел.1}$ от мощността P



фиг.6.Зависимост на загубите $p_{ел.2}$ от мощността P



фиг.7.Зависимост на загубите p_{cm} от мощността P

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработени са алгоритми и математически модели за определяне на съставките на загубите в АМ при динамични и установени режими за най-често използваните закони за честотно управление. С използване на моделите са получени зависимостите на съставките на загубите в изследваната АМ. Направен е анализ на енергийната ефективност на АМ при различните закони за честотно управление.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Владимиров, П. Динамични режими и натоварвания, енергийни характеристики и избиране мощността на асинхронни машини. Дисертация за присъждане на научна степен "Доктор на техническите науки". Габрово 2007.

[2] Костенко М. П., Л. М. Пиотровски. Електрически машини - част II. Техника София, 1965.

За контакти:

Доц. д.т.н. Пенчо Владимиров, Катедра "Електроснабдяване и електрообзавеждане", Технически университет – Габрово, тел.: +359 (0)66 827 253, GSM: 0889229837, e-mail: pvlad@iname.com

Докладът е рецензиран.