

ОПТИМИЗАЦИЯ НАГРУЗОЧНЫХ РЕЖИМОВ РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Запропонована чисельна процедура вибору оптимальної частоти і величини живлячої синусоїдальної напруги асинхронного двигуна для заданих значень швидкості обертання і моменту навантаження з метою забезпечення мінімальних втрат потужності.

Предложена численная процедура выбора оптимальных частоты и величины питающего синусоидального напряжения асинхронного двигателя для заданных значений скорости вращения и момента нагрузки с целью обеспечения минимальных потерь мощности.

ВВЕДЕНИЕ

Энергосбережение – одно из приоритетных направлений технической политики и является наиболее дешевым и безопасным способом увеличения энергогенерирующих мощностей. Так как электроприводы потребляют до 70 % вырабатываемой электроэнергии [1], наиболее существенная экономия электроэнергии может быть достигнута при использовании регулируемых электроприводов. В связи с тем, что среди подобных электроприводов определяющее положение занимают частотно-регулируемые асинхронные электроприводы, оптимизация их режимов будет способствовать решению задачи энергосбережения. Несмотря на достигнутые успехи в области управления асинхронными электроприводами, существует возможность уменьшить их потери мощности в нагрузочных режимах.

Вопросам управления и оптимизации асинхронных электроприводов посвящено немало работ (см. обзор в [1]). Например, в [2] приводятся оптимизированные идеализированные характеристики асинхронного двигателя (АД), построенные по двум упрощенным уравнениям статорной цепи в диапазоне синхронной скорости до теоретически бесконечной. В [3] указывается на существенное влияние насыщения и вытеснения тока на энергетические показатели АД. Авторы работы [4] видят основной резерв повышения эффективности АД в совершенствовании конструкции зубцовой зоны статора. В [5] изложены результаты экспериментального исследования нагрева АД при различных источниках питания, и подтверждено, что минимальный нагрев достигается при питании от источника синусоидального напряжения. Результаты по коррекции механических характеристик тяговых асинхронных двигателей путем изменения частоты и величины питающего синусоидального напряжения, получаемого от преобразователя частоты и числа фаз, помещены в [6].

Из приведенного краткого обзора следует, что при анализе энергетических показателей существует необходимость применения более полного математического описания режимов АД с учетом нелинейности магнитной цепи и разработке конструктивных рекомендаций по повышению эффективности нагрузочных режимов АД.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью статьи является оптимизация нагрузочных режимов асинхронного двигателя по потерям мощности путем выбора величины и частоты питающего

синусоидального напряжения с использованием математического описания во вращающихся dq – координатах и с учетом насыщения магнитной цепи.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АД

В соответствии с [7] уравнения статического режима АД с короткозамкнутым ротором в ортогональных dq – координатах, вращающихся с синхронной скоростью ω_s с опережающим вращением поперечной оси, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} -\omega_s \Psi_{sq} + r_s i_{sd} &= u_{sd}; \\ \omega_s \Psi_{sd} + r_s i_{sq} &= u_{sq}; \\ -(\omega_s - \Omega) \Psi_{rq} + r_r i_{rd} &= 0; \\ (\omega_s - \Omega) \Psi_{rd} + r_r i_{rq} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где u_{sd} , u_{sq} , i_{sd} , i_{sq} , i_{rd} , i_{rq} , Ψ_{sd} , Ψ_{sq} , Ψ_{rd} , Ψ_{rq} – составляющие напряжения статора, токов и потокосцеплений статора и ротора по продольной и поперечной осям; r_s , r_r – сопротивления фазы статора и ротора; Ω – угловая скорость вращения ротора.

Вводя индуктивности рассеяния статора и ротора $L_{\sigma s}$, $L_{\sigma r}$ и потокосцепления в зазоре $\Psi_{\delta d}$, $\Psi_{\delta q}$, получаем для составляющих потокосцеплений

$$\begin{aligned} \Psi_{sd} &= L_{\sigma s} i_{sd} + \Psi_{\delta d}; \quad \Psi_{sq} = L_{\sigma s} i_{sq} + \Psi_{\delta q}; \\ \Psi_{rd} &= L_{\sigma r} i_{rd} + \Psi_{\delta d}; \quad \Psi_{rq} = L_{\sigma r} i_{rq} + \Psi_{\delta q}. \end{aligned}$$

Насыщение магнитной цепи учтем нелинейной зависимостью потокосцеплений в зазоре от продольного и поперечного тока

$$\Psi_{\delta d} = a \cdot \arctg(bi_{\delta d}) + ci_{\delta d}, \quad \Psi_{\delta q} = a \cdot \arctg(bi_{\delta q}) + ci_{\delta q},$$

$$\Psi_{\delta} = \sqrt{\Psi_{\delta d}^2 + \Psi_{\delta q}^2},$$

где $i_{\delta d} = i_{sd} + i_{rd}$; $i_{\delta q} = i_{sq} + i_{rq}$ – продольный и поперечный намагничивающий токи.

Момент АД определяется формулой

$$M = 1,5\sqrt{3} \cdot (i_{sq} \Psi_{\delta d} - i_{sd} \Psi_{\delta q}),$$

а токи статора и ротора – выражениями

$$i_s = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2}; \quad i_r = \sqrt{i_{rd}^2 + i_{rq}^2}.$$

Теперь уравнения статического режима (1) принимают вид (далее полагаем $U_{sd} = 0$; $U_{sq} = -U$)

$$\left. \begin{aligned} -\omega_s \cdot (L_{\sigma s} i_{sq} + \psi_{\delta q} (i_{sq} + i_{rq})) + r_s i_{sd} &= u_{sd}; \\ \omega_s \cdot (L_{\sigma s} i_{sd} + \psi_{\delta d} (i_{sd} + i_{rd})) + r_s i_{sq} &= u_{sq}; \\ -(\omega_s - \Omega) \cdot (L_{\sigma r} i_{rq} + \psi_{\delta q} (i_{sq} + i_{rq})) + r_r i_{rd} &= 0; \\ (\omega_s - \Omega) \cdot (L_{\sigma r} i_{rd} + \psi_{\delta d} (i_{sd} + i_{rd})) + r_r i_{rq} &= 0; \\ M &= 1,5\sqrt{3} \cdot (\psi_{\delta d} \cdot i_{sq} - \psi_{\delta q} \cdot i_{sd}) \end{aligned} \right\} (2)$$

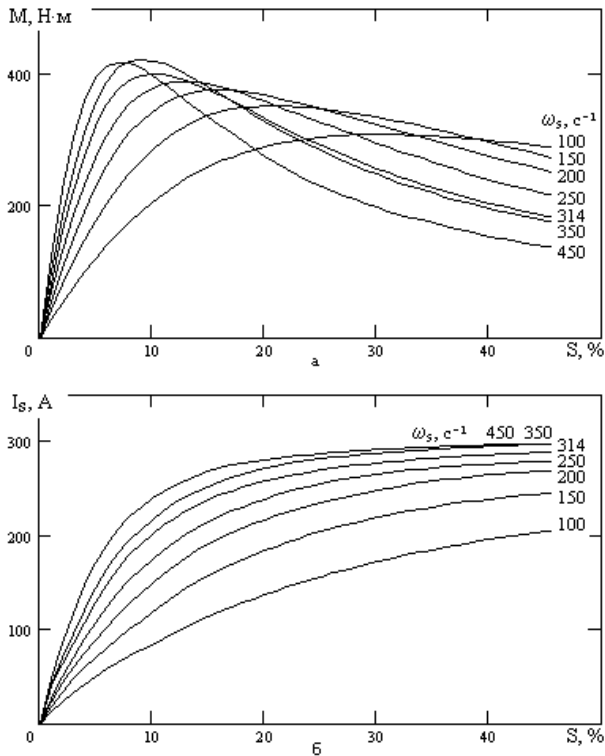


Рис. 1. Характеристики АД: а) механические; б) ток статора

При заданных величинах входного напряжения U и его частоты ω_s , придавая скорости вращения ротора различные значения, решением первых четырех уравнений (2) определяем токи статора и ротора, а по последнему – момент АД, т.е. получаем механические характеристики. На рис. 1,а приведены графики этих характеристик, а на рис. 1,б – зависимости тока статора от скольжения. Графики тока ротора имеют вид, аналогичный рис.1,б. Расчеты выполнены для двигателя мощностью 55 кВт с номинальным напряжением 380 В, линейным током 102 А, скоростью вращения 2940 об/мин и параметрами: $L_{\sigma s} = 2,49$ мГн; $L_{\sigma r} = 1,5$ мГн; $r_s = 0,163$ Ом; $r_r = 0,126$ Ом. Коэффициенты аппроксимации потокоцепления: $a = 0,95$; $b = 0,08$; $c = 0,003$. Напряжение и его частота изменялись в соответствии с отношением

$$\frac{U}{\omega_s} = \frac{U_{ном}}{\omega_{s ном}} = \frac{380}{314} = 1,21.$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Потери мощности двигателя пропорциональны величине

$$P = r_s i_s^2 + r_r i_r^2 + k_m \psi_{\delta}^2 \omega_s + k_{\sigma m} \psi_{\delta}^2 \omega_s^2, \quad (3)$$

где k_m и $k_{\sigma m}$ – коэффициенты, определяющие потери в

стали на перемагничивание и вихревые токи. Поставим задачу выбора таких ω_s и U , чтобы в заданном нагрузочном режиме M и Ω обеспечить минимальное значение потерь мощности P (3). Так как при заданных M и Ω составляющие токов определяются из первого, третьего, четвертого и пятого уравнений (2) при выбранной ω_s , а напряжение U затем определяется из второго уравнения в (2), то P является однозначной функцией ω_s . Поэтому для обеспечения минимума (3) должно выполняться условие

$$\frac{dP}{d\omega_s} = 0, \quad (4)$$

в которое входят составляющие токов i_{sd} , i_{sq} , i_{rd} , i_r и их производные по ω_s . Для определения этих производных выполним дифференцирование первого, третьего, четвертого и пятого уравнений в (2) по ω_s

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d}{d\omega_s} (\omega_s \cdot (L_{\sigma s} i_{sq} + \psi_{\delta q})) + r_s \cdot \frac{di_{sd}}{d\omega_s} &= 0; \\ -\frac{d}{d\omega_s} ((\omega_s - \Omega) \cdot (L_{\sigma r} i_{rq} + \psi_{\delta q})) + r_r \cdot \frac{di_{rd}}{d\omega_s} &= 0; \\ \frac{d}{d\omega_s} ((\omega_s - \Omega) \cdot (L_{\sigma r} i_{rd} + \psi_{\delta d})) + r_r \cdot \frac{di_{rq}}{d\omega_s} &= 0; \\ \frac{d}{d\omega_s} (\psi_{\delta d} \cdot i_{sq} - \psi_{\delta q} \cdot i_{sd}) &= 0 \end{aligned} \right\} (5)$$

где

$$\frac{d\psi_{\delta d}}{d\omega_s} = \left(\frac{a \cdot b}{1 + (b \cdot (i_{sd} + i_{rd}))^2} + c \right) \cdot \left(\frac{di_{sd}}{d\omega_s} + \frac{di_{rd}}{d\omega_s} \right);$$

$$\frac{d\psi_{\delta q}}{d\omega_s} = \left(\frac{a \cdot b}{1 + (b \cdot (i_{sq} + i_{rq}))^2} + c \right) \cdot \left(\frac{di_{sq}}{d\omega_s} + \frac{di_{rq}}{d\omega_s} \right).$$

Оптимальное значение ω_{os} находится численно последовательным совместным решением систем уравнений (2), (5) и (4) для заданного сочетания величин M и Ω . После определения ω_{os} рассчитывается соответствующее оптимальное значение U_o из второго уравнения (2). Далее из первых четырех уравнений (2) определяются токи и потокоцепления, соответствующие оптимальным ω_{os} , U_o , а также коэффициент мощности $\cos\phi$ и КПД η .

Расчет для различных возможных сочетаний M и Ω при $k_m = 0,1$, $k_{\sigma m} = 10^{-3}$ и приведенных выше численных параметрах двигателя показал, что оптимальное скольжение возрастает с ростом M и уменьшается с ростом Ω . Соответствующее оптимальное напряжение увеличивается с ростом M и Ω . Оптимальные значения токов статора и ротора при заданном M не зависят от Ω и возрастают при увеличении M .

На рис. 2,а изображены графики зависимостей оптимального напряжения от Ω для нескольких значений M , а на рис. 2,б – соответствующие графики оптимального скольжения. На рис. 2,в показаны графики оптимальных значений токов статора и ротора. Из рис. 2 следует, что номинальный режим при $\Omega_{ном} = 307,9$ с⁻¹; $M_{ном} = 157$ Н·м; $\omega_s = 314$ с⁻¹; $i_{os} = 60,9$ А; $i_{or} = 53,5$ А близок к оптимальному.

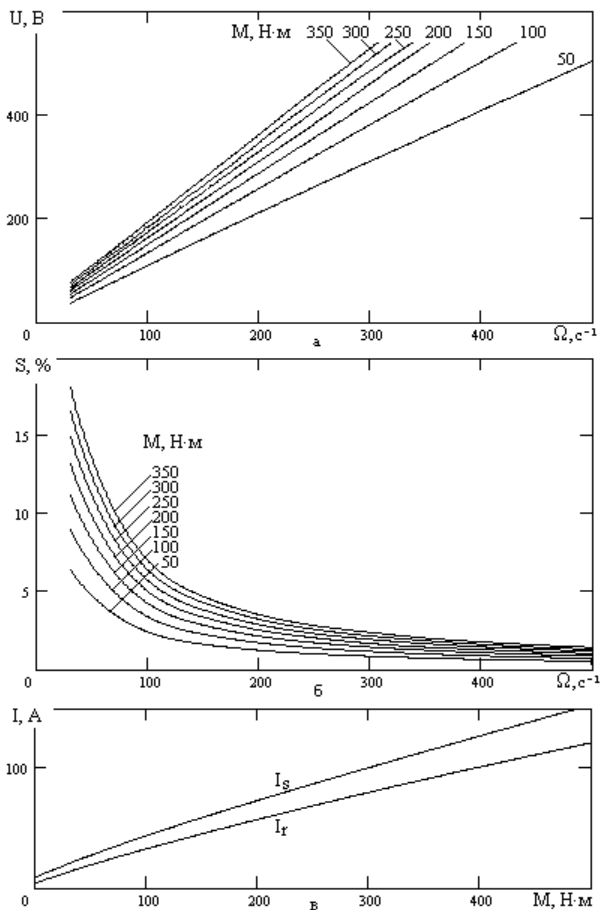


Рис. 2. Оптимальные характеристики АД:
а) напряжение; б) скольжение; в) токи

Рассмотрим режим, который возникает при набросе момента нагрузки до 250 Н·м и желании сохранить номинальную скорость $\Omega_{ном}$. На рис. 3,а изображены возможные реализации этого режима при различных ω_s . Для наглядности график потерь мощности P показан уменьшенным в 10 раз, он имеет выраженный минимум при $\omega_{os} = 313,8 \text{ с}^{-1}$ и при оптимальном напряжении $U_o = 488 \text{ В}$. Оптимальное значение тока статора 86 А, ротора – 65 А. На рис. 3,б приведены также графики $\cos\phi$, КПД η , скольжения и потокоцепления от ω_s , на которых отчетливо выделяется оптимальный режим. На рис.3,в изображены графики зависимостей составляющих потерь мощности от частоты по (3). Графики потерь в стали P_n и $P_{вт}$ показаны увеличенными в 10 раз. Из рис. 3,в следует, что определяющую роль в формировании потерь мощности играют потери P_s в статорной обмотке, которые увеличиваются с уменьшением частоты. Для сравнения: после увеличения нагрузки до 250 Н·м без оптимального регулирования получаем следующие параметры режима: $\Omega = 303,2 \text{ с}^{-1}$; $i_s = 96,1 \text{ А}$; $i_r = 89,8 \text{ А}$. Таким образом, оптимальное регулирование напряжения и частоты позволяет снизить токи двигателя и потери в нагрузочных режимах. Выбор режима $\Omega = 307,9 \text{ с}^{-1}$; $M = 250 \text{ Н·м}$ по механическим характеристикам также дает токи $i_s = 96,2 \text{ А}$; $i_r = 89,9 \text{ А}$ при частоте $\omega_s = 318,6 \text{ с}^{-1}$ и напряжении 385,6 В.

На рис. 4 изображен динамический процесс наброса нагрузки 250 Н·м в момент 0,1 с и регулиро-

вания напряжения до оптимальной величины 488 В в момент 0,5 с. Графики построены по результатам численного решения дифференциальных уравнений, соответствующих статическим уравнениям (2):

$$\frac{di_{sd}}{dt} = D^{-1} \cdot ((L_{\sigma r} + d) \cdot f_1 - d \cdot f_2);$$

$$\frac{di_{rd}}{dt} = D^{-1} \cdot ((L_{\sigma s} + d) \cdot f_2 - d \cdot f_1);$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = Q^{-1} \cdot ((L_{\sigma r} + q) \cdot f_3 - q \cdot f_4)$$

$$\frac{di_{rq}}{dt} = Q^{-1} \cdot ((L_{\sigma s} + q) \cdot f_4 - q \cdot f_3)$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = J^{-1} \cdot (M - M_{нагр}),$$

где

$$f_1 = \omega_s \Psi_{sq} - r_s i_{sd}; \quad f_2 = (\omega_s - \Omega) \Psi_{rq} - r_r i_{rd};$$

$$f_3 = U - \omega_s \Psi_{sd} - r_s i_{sq}; \quad f_4 = -(\omega_s - \Omega) \Psi_{rd} - r_r i_{rq};$$

$$d = \frac{a \cdot b}{1 + b^2(i_{sd} + i_{rd})^2} + c; \quad q = \frac{a \cdot b}{1 + b^2(i_{sd} + i_{rd})^2} + c;$$

$$D = L_{\sigma s} L_{\sigma r} + (L_{\sigma s} + L_{\sigma r})d; \quad Q = L_{\sigma s} L_{\sigma r} + (L_{\sigma s} + L_{\sigma r})q;$$

J – момент инерции.

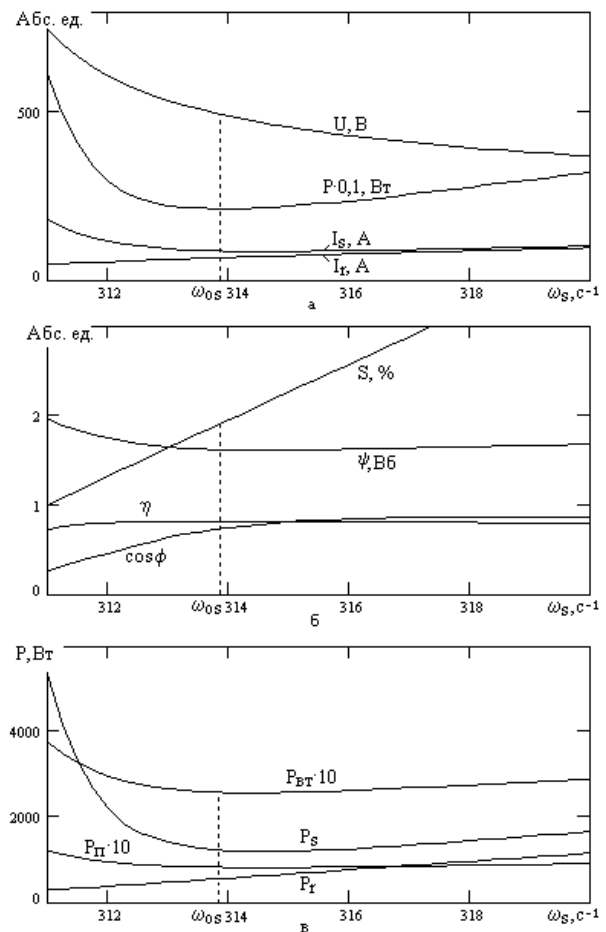


Рис. 3. Оптимизация нагрузочного режима:
а) напряжение, потери мощности, токи;
б) скольжение, потокоцепление, КПД, коэффициент мощности;
в) составляющие потерь мощности

Рис. 4 показывает, что после регулирования скорость вращения восстанавливает значение $307,9 \text{ c}^{-1}$, а токи статора и ротора снижаются до оптимальных минимальных величин. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с данными, полученными в [6] для тяговых АД.

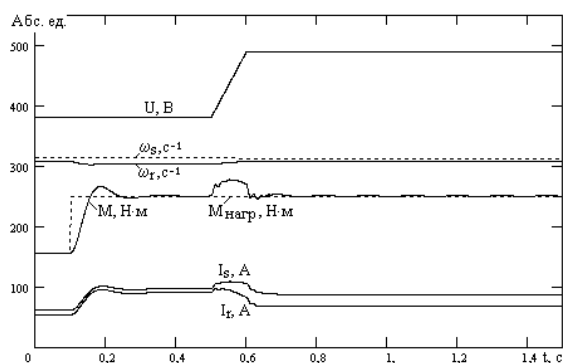


Рис. 4. Оптимизация динамического процесса наброса нагрузки

ВЫВОДЫ

Предложенная численная процедура позволяет выбирать оптимальные значения величины и частоты синусоидального питающего напряжения асинхронного двигателя для заданных скорости вращения и момента нагрузки при обеспечении минимальных потерь мощности. Оптимальное регулирование эффективно при превышении моментом нагрузки номинального значения. Перспективным является аппаратная реализация системы оптимального регулирования напряжения и частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов. – М.: изд. центр "Академия", 2004. – 256 с.
2. Шийка А.А. Энергетические и регулировочные характеристики асинхронного электропривода с оптимальным векторным управлением / А.А. Шийка, Е.М. Потапенко // *Электротехника та електроенергетика*. – 2012. – № 1. – С. 45-50.
3. Петрушин В.С. Влияние насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора на энергетические показатели регулируемых АД / В.С. Петрушин, А.М. Якимец, Б.В. Каленик // *Электротехника і електромеханіка*. – 2008. – № 1. – С. 38-40.
4. Кононенко К.Е. Основной резерв повышения энергоэффективности асинхронных двигателей с КЗ ротором / К.Е. Кононенко, А.В. Кононенко, С.В. Крутских // *Известия ВУЗов. Сер. Электромеханика*. – 2012. – № 1. – С. 54-60.
5. Петренко А.М. Экспериментальное исследование нагрева частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных источниках питания / А.М. Петренко // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2010. – № 5. – С. 21-23.

6. Коношинский А.Ю. Оценка эффективности видов электрической коррекции электромеханических характеристик асинхронных тяговых двигателей / А.Ю. Коношинский // *Известия ВУЗов. Сер. Электромеханика*. – 2000. – № 3. – С. 30-34.
7. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский. – М.: изд. центр "Академия", 2006. – 272 с.

Bibliography (transliterated): 1. Braslavskij I.Ya. `Energosberegayuschij asinhronnyj `elektroprivod / I.Ya.Braslavskij, Z.Sh.Ishmatov. – M.: izd. centr "Akademiya", 2004. – 256 s. 2. Shijka A.A. `Energeticheskie i regulirovochnye harakteristiki asinhronnogo `elektroprivoda s optimal'nym vektornym upravleniem / A.A.Shijka, E.M.Potapenko // *Elektrotehnika ta elektroenergetika*. – 2012. – № 1. – S. 45-50. 3. Petrushin V.S. Vliyanie nasyscheniya stali magnitoproveda i vytesneniya toka v obmotke rotora na `energeticheskie pokazateli reguliruemyh AD / V.S.Petrushin, A.M.Yakimec, B.V.Kalenik // *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2008. – № 1. – S. 38-40. 4. Kononenko K.E. Osnovnoj rezerv povysheniya `energo`effektivnosti asinhronnyh dvigatelej s KZ rotorom / K.E.Kononenko, A.V.Kononenko, S.V.Krutskih // *Izvestiya VUZov. Ser. `Elektromehanika*. – 2012. – № 1. – S.54-60. 5. Petrenko A.M. `Eksperimental'noe issledovanie nagreva chastotno-upravlyаемого asinhronnogo dvigatelya pri razlichnyh istochnikah pitaniya / A.M.Petrenko // *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2010. – № 5. – S. 21-23. 6. Konashinskij A.Yu. Ocenka `effektivnosti vidov `elektricheskoy korrekcii `elektromehaničeskikh harakteristik asinhronnyh tyagovyh dvigatelej / A.Yu.Konashinskij // *Izvestiya VUZov. Ser. `Elektromehanika*. – 2000. – № 3. – S.30-34. 7. Sokolovskij G.G. `Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem / G.G.Sokolovskij. – M.: izd. centr "Akademiya", 2006. – 272 s.

Поступила 01.02.2013

Канов Лев Николаевич, к.т.н., доц.

Севастопольский национальный технический университет
кафедра судовых и промышленных электромеханических систем
99053, Севастополь, ул. Университетская, 33
тел. (0692) 435-272

Kanov L.N.

Optimization of loading modes of a controlled asynchronous electric drive.

The paper introduces a numerical procedure of an asynchronous motor optimum frequency and feed sine-wave voltage selection for given values of the motor speed and load moment to provide minimum power loss.

Key words – asynchronous motor, stationary loading mode, mathematical description, optimum voltage, optimum frequency, power loss.