

## Възможности за подобрене ефективността на асинхронните двигатели, използвани в помпените и вентилаторните системи

Генчо Ст. Попов, Борис Зв. Костов, Климент В. Климентов

*Possibilities to improve the efficiency of induction motors used in pump and fan systems. This paper presents a review of some methods for improving the efficiency of induction motors. Since induction motors are the biggest energy users in the industry, improving the efficiency is a very important challenge. Also, determining a way to accomplish this will increase the effectiveness of the whole pump (fan) system.*

**Key words:** induction motor, high efficiency induction motor, variable speed drive, soft starter

### ВЪВЕДЕНИЕ

Нуждите на човечеството от използване на електрическа енергия нарастват непрекъснато, а ресурсите намаляват, което е основателна причина за изработването на дългосрочна стратегия и политика за рационалното ѝ използване. Всичките усилия са насочени към намирането на нови източници или към оптимизирането работния процес на вече съществуващи системи, от гледна точка на енергийната им ефективност. В резултат на това са въведени редица международни и европейски стандарти, целящи използването на високо ефективни уреди и консумация на енергия. Един от най-големите консуматори на електроенергия са асинхронните двигатели, които според някои източници представляват над 50% от цялостната енергийна консумация в индустриално развитите страни.

Целта на настоящата работа е да се разгледат някои от основните възможности за подобрене на енергийната ефективност на асинхронните двигатели.

### ИЗЛОЖЕНИЕ

За да се подобри ефективността на цялата помпена (вентилаторна) система, първо трябва да се провери възможността за редуциране на загубите, а след това да се осигури работен режим на цялата система, близък до най-ефективната работна точка на двигателя [6]. Основните предимства, поради които асинхронните двигатели са предпочитани са: ниската цена, простото и надеждно устройство, високият КПД, отсъствие на колектор, възможност за директно захранване от електрическата мрежа и др. [2]. Ефективността на един двигател е свързана с неговия коефициент на полезно действие, който зависи от различни фактори, като например – електрическата мощност, честотата на тока, въртящия момент, ъгловата скорост и др. и се определя по зависимостта:

$$(1) \quad \eta = \frac{P_{\text{МЕХ}}}{P_{\text{ЕЛЕК}}} = \frac{P_{\text{МЕХ}}}{P_{\text{МЕХ}} + \Delta P'}$$

където  $P_{\text{МЕХ}}$  е мощността на изхода,  $P_{\text{ЕЛЕК}}$  - мощността на входа и  $\Delta P'$  са загубите на мощност в самия електродвигател.

Ефективността на даден двигател е основен критерий при избора му за конкретна система, затова необходимо е да се знае и характеристиката на КПД при различни натоварвания от номиналното. Тъй като ефективността се променя с промяна на натоварването, възможно е двигател, предназначен да работи с висока ефективност при пълно натоварване, да не гарантира същата ефективност и при частично натоварване.

Един от най-лесните начини за определяне на средната ефективност, предварително знаейки от производителя коефициентите на полезно действие при 50% и 75% от номиналното натоварване е [12]:

$$(2) \quad (1 \cdot \eta_{(100\%)} + 0,75 \cdot \eta_{(75\%)} + 0,5 \cdot \eta_{(50\%)}) / 2,25 .$$

Дори и при правилен избор на двигател за дадена система, възникват въпроси, как тя да бъде подобрена така, че да се намали консумацията на енергия в нея. За целта може да се използват някои конструктивни методи и решения, както и с помощта на допълнителни устройства да се промени някой или някои от факторите, оказващи влияние върху ефективността.

Според [5], за повишаване ефективността на двигателя е необходимо:

- *корекции при доставката на електричество*: осигуряване на напрежение близо до номиналното, с максимално отклонение не повече от 5%; фазовата небалансираност да не е по-голяма от 1%; да се поддържа висок фактора на мощност; да се избегне висока хармоничност на напрежението; да се използват по-дебели проводници;

- *подобрения в ефективността на двигателя* – при режими на непълно натоварване може да бъде променена схемата на статорната намотка от съединение "Δ" в съединение "Y"; подмяна с високо енергийно ефективен двигател; използване на допълнителни устройства;

- *оптимизирани електрически системи* – използване на мониторинг и автоматизирани системи за доставяне на мощност само, когато това е необходимо; избор на подходящ двигател за конкретната система;

- *задвижващо натоварване и оптимизиране на работния процес* – промяна на работния режим с цел да се изисква по-малка входяща мощност; използване на високо ефективни подсистеми (помпа, вентилатор, съединител, скоростна кутия и др.);

- *поддръжка*.

За постигане на ефективна работа, освен коефициента на полезно действие на двигателя е важен и факторът на мощност, като при негови стойности, по-малки от приетия минимум (в интервала от 0 до 1), се увеличават загубите в електроразпределителните системи.

**Конструктивни методи за промяна на основни показатели на двигателя с цел подобряване на ефективността му.** Те се изразяват най-често в използването на допълнителни или по-качествени материали, както и в подобряване на производствения процес, с което се цели постигането на завишени характеристики на двигателя.

Прието е общите загуби да се разделят на няколко основни групи, като за всички тях са известни някои технологични решения как да бъдат редуцирани, с цел повишаване ефективността на двигателя [10]:

*загуби в металната част* – използването на подходяща стомана за корпуси с удължена конструкция и по-тънки стени намалява загубите от вихровите токове;

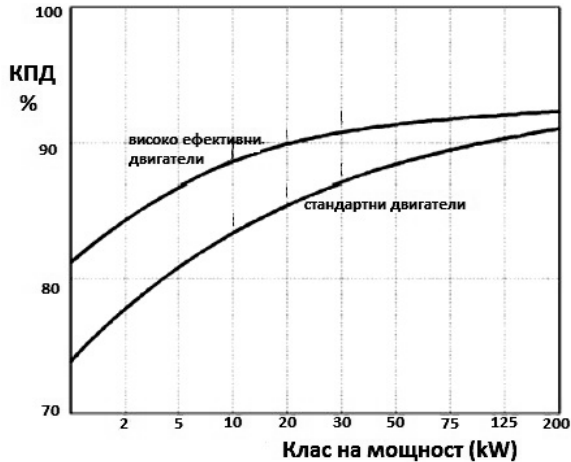
*загуби в статора* ( $I^2 \cdot R$ ) – използването на повече мед, както и на по-дебели проводници увеличава напречното сечение на статорните намотки, понижава съпротивлението им ( $R$ ) и намалява загубите на тока ( $I$ );

*загуби в ротора* ( $I^2 \cdot R$ ) – използването на по-големи решетки на ротора ще доведе до нарастване на напречното сечение, понижавайки съпротивлението им ( $R$ ) и намалявайки загубите на електрическия ток ( $I$ );

*загуби от триене и загуби в намотките* – използването на ефективен вентилатор ще ги намали;

*загуби от електрически смущения по време на работа* – оптималното проектиране и провеждането на качествен контрол при производството ще осигури минимални загуби от електрически смущения.

Използването на енергийно ефективни двигатели също е алтернатива за постигане на по-висока ефективност.



Фиг.1 Сравнение между ефективностите на стандартен и високо енергийно ефективен двигател (според [10])

Доказано е, че по-големите загуби при стандартните двигатели водят до по-ниска обща ефективност, в сравнение с енергийно ефективните. Въпреки това подмяната на двигателя не предлага общо решение за значително пестене на енергия. Според [4] е възможно двигателят да има с 5% или дори по-висока ефективност, но намалението в консумацията на електрическа мощност да е минимално. Една от основните причини за това е, че високо ефективните двигатели работят с по-малко хлъзгане.

Промените в ъгловата скорост се отразяват повече на дебита на помпата, а също така в осигуряването на по-голяма мощност, така че постигането на по-значителни икономии на енергия не винаги е постижимо [4].

**Експлоатационни методи за повишаване на ефективността.** С тези методи се цели промяната на някои от факторите, влияещи върху ефективността на двигателя (ъгловата скорост, честотата на напрежението, моментът, доставянето на захранващата електрическа мощност, степента на натоварване и др.), с идеята тя да бъде подобрена.

**Контрол върху ъгловата скорост.** Използването на променливо скоростно задвижване (чрез честотен инвертор) в помпени (вентилаторни) системи в сравнение с такива, където се използва постоянна скорост с дроселно или клапанно регулиране, или така наречените - тип байпас, предлага значителни икономии на енергия.

Известни са няколко основни критерия при използването на променливо скоростно задвижване, за да бъде ефективна работата на двигателя. Първият е определянето на скоростния диапазон, което представлява отношението на минималната към максималната допустими скорости в установен режим, възможни при дадения метод за регулиране [2]:

$$(3) \quad D_r = \omega_{MAX} / \omega_{MIN}.$$

Вторият критерий е плавността на регулиране и се дефинира, като отношение на две съседни скорости, при преминаване от една регулировъчна характеристика към съседна [2]:

$$(4) \quad K_{пл} = \omega_i / \omega_{i-1}.$$

Друг критерий е икономичността на регулиране, която характеризира загубите

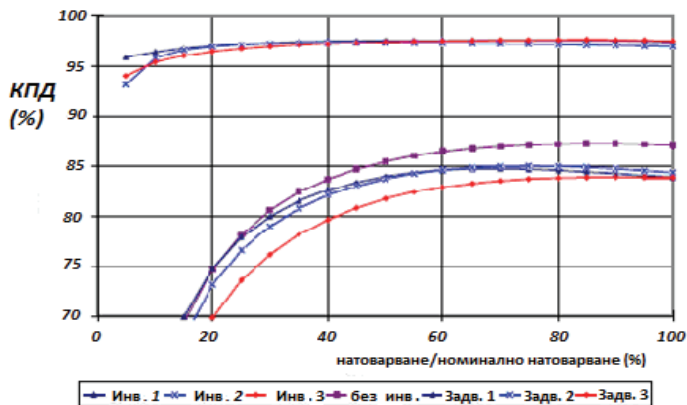
на енергия, отделящи се във вид на топлина от регулиращите устройства [2]:

$$(5) \quad \eta_p = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P},$$

където  $P_2$  е мощността на вала на двигателя и  $\Delta P$  са загубите на мощност в регулиращите устройства. Според [2] съществуват и още два критерия, определящи ефективността на регулирането: посока на регулирането и условия за натоварване.

За повечето честотни инвертори е известно, че имат ефективност между 95 – 98%, което е с няколко % по-ниска от случаите, когато двигателят е директно свързан към мрежата, но въпреки това те притежават огромен потенциал за пестене на енергия [12]. По този начин е възможно скоростта да бъде намалена до съотношение 9:1 (11% от пълната скорост), както и да бъде увеличена до 3:1 (300% от пълната скорост), което е гаранция за огромното им влияние върху работния режим, респ. върху ефективността [12].

Променливо скоростните задвижвания могат да се разделят на две групи – с *постоянен* и с *променлив* въртящ момент. Възможността за икономии на енергия при работа с променлив момент са много по-големи, отколкото на тези с постоянен, поради факта, че консумацията на ток е пропорционална на честотата на въртене на трета степен, което води до значително намаляване на използваната енергия дори и при съвсем слабо намаление на скоростта. Например, за помпена (вентилаторна) система, при 75% от честотата на въртене се достигат 75% от дебита, като се използва само 42% от консумацията на ток, необходима при пълно натоварване. Така, ако потокът бъде намален на 50%, потреблението на ток ще се намали с 12,5% [1].



**Фиг. 2 Ефективност на 3 различни честотни инвертори, и сравнение на ефективностите на асинхронен двигател, директно свързан към мрежата с тези при свързване с 3-те инвертора (според [12])**

Вижда се, че ефективностите на трите различни инвертора не се различават значително. При директно свързване на двигателя към мрежата, опитно е постигнат работен режим, при който променлив фактор е само натоварването. В случаите с използването на инвертори са получени характеристики на ефективността, близки до тази при директното свързване.

Новото поколение инвертори притежават допълнителни функции за оптимизиране на енергийния разход на цялата помпена (вентилаторна) система. При повишаване честотата на въртене на вала на двигателя с 10% , ще се повиши и

напрежението с 10%, тогава автоматична функция може да оптимизира нивото на напрежението чрез регулирането му, което би довело до известни икономии на енергия до 5%. Освен това, някои инвертори имат възможността при необходимост да изключват охлаждащите вентилатори и по този начин да допринесат за постигането на по-висока ефективност [1].

**Контрол върху честотата на напрежението.** В повечето помпени (вентилаторни) системи се използват асинхронни двигатели, заради възможността им да работят с променливо напрежение. Обаче по-голямата хармоничност на тока и напрежението внасят допълнителни загуби в двигателя и намаляват КПД. Следователно, честотата на напрежението е пряко свързана с ефективността на асинхронните машини.

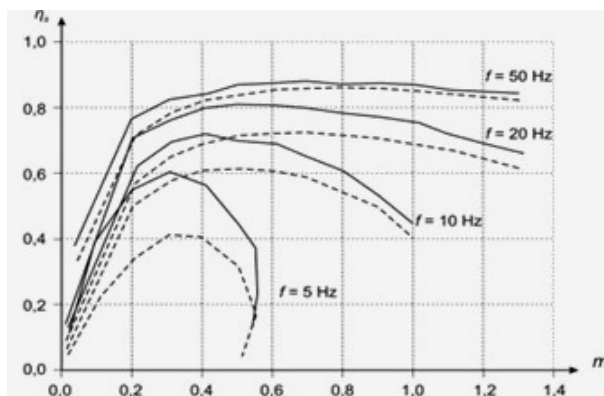
В случаите, когато двигателят е захранван с постоянно напрежение, загубите във вътрешността на статора  $\Delta P_{Fev}$  при  $v$ -тата хармоничност са [7]:

$$(6) \quad \Delta P_{Eev} = \Delta P_{Fe(v=1)} \cdot \left( \frac{U_v}{U_{v=1}} \right)^2 \cdot \left( \frac{f_v}{f_{v=1}} \right)^\beta \cdot \left( \frac{f_{v=1}}{f_v} \right)^2,$$

където  $P_{Fe}$  са загубите на мощност във вътрешността на статора,  $U_v$  - доставеното напрежение на  $v$ -тата хармоничност,  $f_v$  - честотата на напрежение на  $v$ -тата хармоничност. Приемайки  $\beta = 1,3$ , полученият резултат е [7]:

$$(7) \quad \Delta P_{Eev} = \Delta P_{Fe(v=1)} \cdot \left( \frac{U_v}{U_{v=1}} \right)^2 \cdot \left( \frac{f_{v=1}}{f_v} \right)^{0,7}.$$

Видимо е, че загубите във вътрешността на статора, причинени от по-високата хармоничност са малки и намаляват заедно с нея. Следователно, постигането на занижени стойности на хармоничност на напрежението ще доведе до редуциране загубите на мощност в ротора и до повишаване на ефективността [7].



**Фиг. 3 Ефективност ( $\eta_s$ ) на асинхронен двигател с мощност 7,5 kW като функция на относителния въртящ момент  $m^*$  при натоварване [7]**

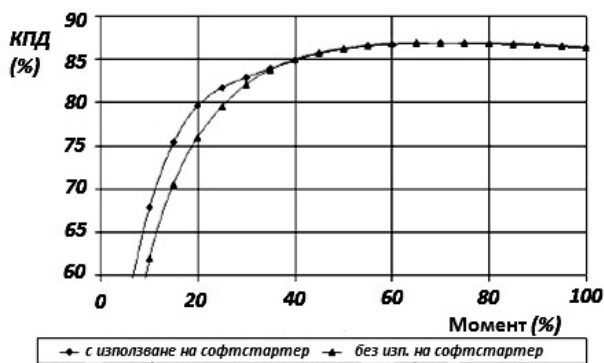
На фиг. 3 е показано сравнение на ефективностите на един и същ двигател (7,5kW), с включването на всички фактори, оказващи влияние върху ефективността при захранване с постоянно (прекъснатата линия) и с променливо (непрекъснатата линия) напрежение. Безспорно по-добрата ефективност е при второто. И в двата случая се наблюдава сходство при ефективностите за интервала 30 – 50Hz.

Съгласно [7], за доставено напрежение с честота  $f > 0,6f_{nom}$ , общите загуби,

причинени от повишаването на хармоничността са 2–5% максимум. За редуцирането им се препоръчва използването на филтър, монтиран на изхода на инвертора.

**Контрол на пусковия момент на асинхронен двигател.** Известни са три начина на пускане: директно; с понижено напрежение и реостатно пускане с резистори в роторната кутия (само за двигатели с навит ротор) [2]. Тъй като при включването на двигателя се получава по-голям въртящ момент от необходимия и последва претоварване, това оказва негативно влияние върху ефективността му. Доста често за решаване на този проблем се използват софтвертери. В основата на тези устройства е тиристорният комутатор на напрежение, разгледан в [3].

Обикновено използването на софтвертери, с цел пестене на енергия, се извършва, за да се оптимизира електрическият ток, преминаващ през машината. Представа за ефекта от използването им може да се види от графиката на фиг. 4, отразяваща ефективността на 11kW асинхронен двигател със и без използването на софтвертер.



Фиг.4 Ефективност на 11kW двигател си без използването на софтвертер (според [12])

**Предимства:** подобрен фактор на мощността; макар и с малко, но КПД се повишава при малки натоварвания (в случая в интервала от 0–40%); по-ниско механично натоварване; по-малка механична поддръжка и др.

**Недостатъци:** при пълно натоварване софтвертерът има отрицателен ефект върху ефективността, заради загубите, които се получават в него; спестената енергия е много малка и намалява с увеличаване на натоварването.

Възможно е постижимата икономия на енергия, използвайки софтвертер, е ограничена и рядко надвишава 5% от стойността на изходящата мощност, и то само при режими на натоварване под 50% от номиналното [12].

**Контрол върху доставянето на захранващото напрежение от мрежата.** При използването на високо напрежение може да се постигнат значителни икономии чрез мониторинг, следящ за употребата на мощността, който да намали ненужните разходи или напълно да ги изключи.

**Автоматичен контролер за напрежение.** Той цели осигуряването на максимална енергийна ефективност така, че нуждите на потребителя да бъдат задоволени, а натоварването по време на работа да бъде управляемо. За принципа му на действие се знае, че при достигане до определена стойност на натоварване се подава звуков сигнал и при липса на реакция, контролерът започва да изключва всички ненужни натоварвания, следвайки определена логическа последователност [10]. По този начин е възможно осигуряването на ефективен непрекъснат работен

процес, респ. и повишаване на ефективността.

**Автоматично регулиращо реле.** Функциите му се изразяват в регулиране фактора на мощността за дадена система с цел повишаване на ефективността ѝ, чрез включване и изключване на кондензаторите. Релето е „мозъка“ на регулиращата система, като за него се знае, че има вграден сензор, който отчита фактора на мощността и превръща сигнала в директно управляемо напрежение, което се сравнява с препоръчаното [10].

**„Интелигентен“ контролер за фактора на мощността.** Тези устройства следят всяка стъпка през време на първия час от работата и запазват информацията в паметта си. На базата на измервания, те избират най-подходящите действия, елиминирайки проблемите, възникващи обикновено при включването на кондензаторите [10]. Така, освен че спомагат за осигуряване на надежден и ефективен режим на работа на цялата система, то самите контролери са по-ефективни.

**Устройства за вихрово токови задвижвания.** В този случай се използва вихрово токов съединител за промяна на изходящата скорост. Той се състои от първичен елемент, съединен с вала на двигателя и свободно въртящ се вторичен елемент (отделно натоварен), свързан с натоварващия вал. Чрез регулиране на възбуждането, скоростта може да се променя до необходимата за изисканото натоварване, което гарантира ефективен режим на работа. Недостатък е сравнително слабата ефективност при ниски скорости [10].

**Системи за възстановяване на мощността при хлъзгане.** Те са по-ефективна алтернатива за управление при асинхронните двигатели. Принципът на работа се изразява в промяна на напрежението на ротора за постигане на нужната скорост, но част от мощността се губи в резисторите, а излишната се събира от плъзгащите пръстени и се връща към захранващата линия под формата на механична мощност. Заради високите експлоатационни изисквания тези системи са икономични в случаите, когато се работи с високи мощности или скоростния диапазон на двигателя е 1:5 или по-малък [10].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Става ясно, че факторите, влияещи и определящи коефициента на полезно действие на асинхронен двигател са твърде много. Повечето от тях са взаимно зависими, което прави намирането на общо решение за повишаване на ефективността доста трудна задача, но въпреки това, за всеки конкретен случай, тя може да бъде подобрена.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** *Изследванията са подкрепени по договор № BG051PO001-3.3.04/28, „Подкрепа за развитие на научните кадри в областта на инженерните научни изследвания и иновациите“. Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси“ 2007-2013, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз“*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1.] Ристимеки Т., Энергийна ефективност посредством честотни преобразователи, CentraLine c/o Honeywell GmbH, 08. 2008
- [2.] Яков В., Автоматизирано електрозадвижване, РУ „Ангел Кънчев, Русе, 2003
- [3.] Яков В., Защити в електрозадвижванията, РУ „Ангел Кънчев, Русе, 2005
- [4.] Khan MA., Pati D. & Mzungu HM., Comparison of 3kW standard and high efficiency induction motor, University of Cape Town, South Africa
- [5.] Khandkhediya D., How to Reduce Motor Drive energy coast
- [6.] Laborelec E. M., Power quality & Utilisation Guide, February, 2007

- [7.] Lukasic Z., Scychta L., Analysis of efficiency characteristics of squirrel-cage induction motor loaded with water system pump, Technical University of Radom, Poland
- [8.] Mahendran N., Gurusamy G., Fuzzy controller for matrix converter system to improve its quality of output, Department of Electrical Engineering, Bannari Amman Institute of Technology, India, 2010
- [9.] Manoharan S., Devarajan N., Deivasahayam S. & Ranganathan N., Review on efficiency improvement in squirrel cage induction motor by using DCR technology, Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL. 60, NO.4, 2009, 227 -236
- [10.] MAXIMUM DEMAND CONTROLLER, chapter 10 "Energy efficient technologies in electrical systems, 177-189
- [11.] Mzungu HM., Barendse P., Khan MA. & Manyage M., Determination of effects on induction motor efficiency, University of Cape Town, Department of Electrical engineering, South Africa
- [12.] Stales B., Van Roy P., Belmans R. & Hameyer K., Energy efficiency of induction machines, Katholieke Universiteit Leuven, E. E. Dept., Div. ESAT/ELEN, Belgium

**За контакти:**

Доц. д-р Генчо Попов, Катедра - "Топлотехника, хидро и пневмотехника", Русенски университет "Ангел Кънчев", e-mail: [gspopov@uni-ruse.bg](mailto:gspopov@uni-ruse.bg)

Инж. Борис Звездов Костов, "Топлотехника, хидро и пневмотехника", Русенски университет "Ангел Кънчев", e-mail: [bkostov@uni-ruse.bg](mailto:bkostov@uni-ruse.bg)

д-р Климент Климентов - Катедра "Топлотехника, хидро и пневмотехника", Русенски университет "Ангел Кънчев", e-mail: [klimentov@uni-ruse.bg](mailto:klimentov@uni-ruse.bg)

**Докладът е рецензиран.**