

## Анализ на методите за определяне на относителното натоварване на асинхронните двигатели в експлоатационни условия

Миглена Христова, Вяра Русева

***Analysis of Induction Motor Load Estimation Methods Under Field Conditions:** The induction motor load is an important factor for determining their efficiency. This article analyses the methods used in the field to determine the induction motor load. The article concludes with recommendations on which method should be used under which circumstances. This will allow to make the right choice of method to estimate the induction motor load.*

**Key words:** induction motor, load under field condition, energy efficiency

### ВЪВЕДЕНИЕ

В съответствие със Закона за енергийната ефективност и Наредбата за неговото приложение всички промишлени предприятия с годишно потребление на енергия по-голямо от 3000MWh, подлежат на задължително обследване за оценка на енергийната ефективност на промишлените системи най-малко веднъж на всеки пет години. Електрозадвижващите системи, като един от най-големите консуматори на електрическа енергия в промишления сектор, също се оценяват за цел набелязване мерки за повишаване на тяхната ефективност и намаляване консумацията на електрическа енергия. Определянето на относителното натоварване на електродвигателите е основната задача [1, 7] при изследване на задвижващите системи, след което може да се определи експлоатационният к.п.д. на двигателя. Стандартните методи за изпитване и определяне к.п.д. на електрическите машини са лабораторни методи с висока точност, изискващи специални условия и апаратура за провеждането им, които са трудно приложими в практически условия.

Разработени са множество методи [3, 10, 13] за оценка енергийната ефективност на АД в експлоатационни условия, които се различават по своята сложност, смущаващо въздействие върху технологичния процес, по точността си, безопасността, цена и др.

**Целта** на работата е да се направи анализ на приложението на методите за определяне на относителното натоварване на асинхронните двигатели в експлоатационни условия.

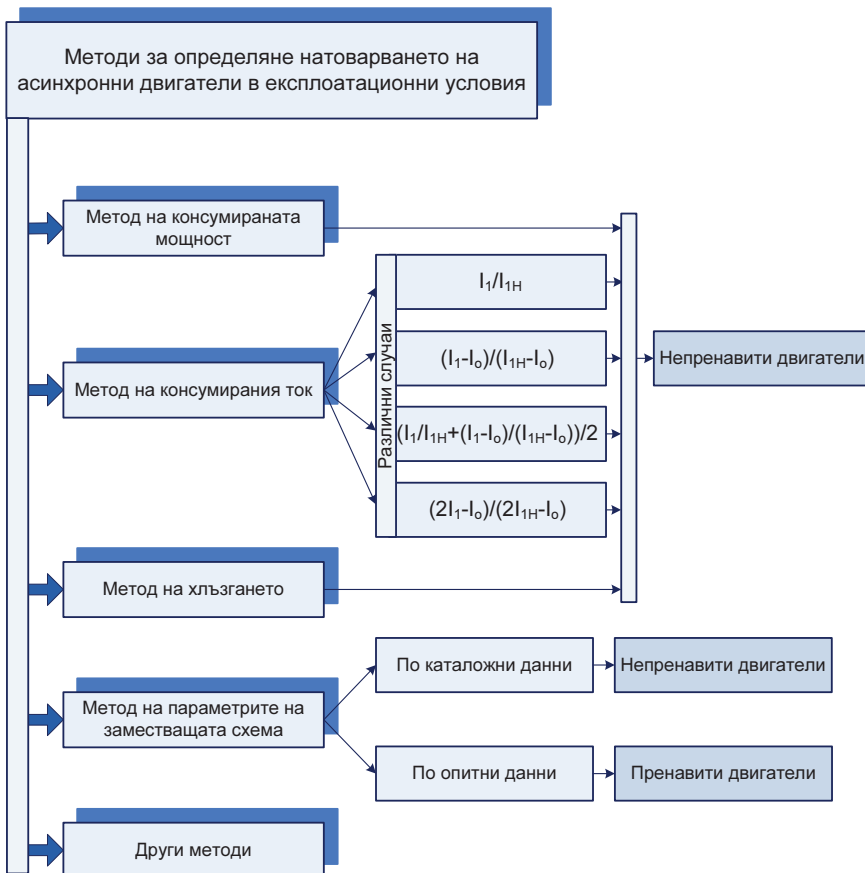
### ИЗЛОЖЕНИЕ

Съществува голямо разнообразие от методи, които се използват за определяне на относителното натоварване на асинхронните двигатели в реални експлоатационни условия. От направен анализ [5, 7] е установено, че най-разпространените методи за определяне на натоварването в експлоатационни условия са метода на консумираната мощност, на тока и на хлъзгането. При използването на тези методи се получават резултати с различна точност, като в практиката се избира един от методите в зависимост от това с каква измервателна апаратура разполага предприятието.

При изследването на електрозадвижващите системи е необходимо да се провери съответствието между номиналната мощност на електродвигателя и мощността, консумирана от задвижваната машина. Тази оценка може да се направи като се определи относителното натоварване (ОН) на електродвигателя в системата.

Относителното натоварване е термин, с който се описва действителното натоварване, с което работи двигателят, по отношение на номиналното натоварване дадено на табелката на двигателя. ОН е отношението на мощността на вала на

двигателя  $P_2$  в експлоатационни условия към номиналната мощност  $P_{2ном}$  на електродвигателя -  $P_2/P_{2ном}$ .



Фиг. 1. Методи за определяне натоварването на асинхронните двигатели в експлоатационни условия

В производствени условия определянето на  $P_2$  е трудно осъществимо, затова се предпочитат приблизителни методи. За предпочитане е метода на консумираната мощност поради това, че другите два имат по-малка точност. При известни номинални данни от идентификационната табелка на АД и измерените на място действителни стойности на  $P_1$ ,  $I_1$ , захранващо напрежение  $U_1$ , коефициент на мощност  $\cos\phi$  и  $n$ , може да се изчисли относителното натоварване.

На фиг. 1 е представена класификация на методите за определяне натоварването на асинхронните двигатели в експлоатационни условия. На същата фигура е показано кой метод в какви случаи е приложим.

Голяма част от АД в експлоатация са пренавивани, което влошава енергийните им показатели, к.п.д. намалява с (0,5...2)% [8]. Използването на трите приблизителни метода за определяне на натоварването при тези двигатели води до значително по-големи грешки, тъй като липсва съответствие между данните посочени на табелката

на АД и реалните данни при натоварване с номинална мощност. В този случай се препоръчва да се използва методът на параметрите на заместващата схема [2], определени по опитен път.

### Метод на консумираната мощност

Когато е възможно да се измери консумираната мощност  $P_1$  е препоръчително да се използва този метод за определяне на относителното натоварване [1]. При измерване на захранващото напрежение  $U_1$ , консумирания ток  $I_1$  и  $\cos\phi$  първо се изчислява консумираната. При новите серии АД, на табелката на двигателя е посочен к.п.д. на двигателя при номинално натоварване. Трифазната консумирана мощност при номинален режим може да се определи от номиналните данни на АД като се използва данните за к.п.д. и номиналната мощност на двигателя.

Ако на табелката на двигателя не е даден к.п.д. при номинално натоварване, както е при двигателите от по-старите серии, е необходимо първо да се изчисли консумираната мощност при номинално натоварване, като се използват номиналните стойности на тока, напрежението и  $\cos\phi$  от табелката на двигателя. След това се изчислява и номиналният к.п.д.

Относителното натоварване по консумирана мощност се получава, като се раздели измерената или изчислена консумирана мощност, на консумираната мощност при номинален режим.

В табл. 1. са дадени формулите за изчисляване на относителното натоварването по метода на консумираната мощност в зависимост от вида на натоварването на асинхронния двигател.

В някои електрозадвижващите системи натоварването на двигателите се изменя във времето по случаен закон. Затова е необходимо да се използва точен метод за намиране на средното натоварване, като се използват възможностите на съвременните измервателни уреди за записване на консумираната мощност за определен период от време.

Таблица 1

Определяне на ОН на АД при различен тип натоварване

Методи за определяне на ОН	Постоянно натоварване	Натоварване, изменящо се на случаен принцип	Постоянно натоварване за определени интервали от време
Метод на консумираната мощност	$OH = \frac{P_1}{P_{1H}}$	$OH = \frac{1}{P_{1H}} \frac{1}{T} \int_0^T P_1(t) dt$	$OH = \frac{1}{P_{1H}} \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n P_{1i} t_i$
Метод на тока	$OH = \frac{I_1 U_1}{I_{1H} U_{1H}}$	$OH = \frac{1}{I_{1H}} \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt$	$OH = \frac{1}{I_{1H}} \frac{1}{T} \sum_i I_{1i} t_i$

При използване метода на консумираната мощност за определяне на натоварването на АД за задвижвания, които работят с натоварване, което се изменя във времето по случаен закон, е необходимо консумираната мощност,  $P_1(t)$  да се определи като средна стойност за определен цикъл  $T$ .

Когато за отделни интервали от време  $t_i$  мощността е постоянна и равна на  $P_1$ , то се преминава от интегриране към сумиране на консумираните мощностите за съответните интервали (табл.1). Реално последната формула се използва за определяне на средната стойност на  $P_1$ , когато се измерва консумираната енергия чрез електромер за целия цикъл  $T$ .

За получаване на информация как се изменя натоварването, цикълът се дискретизира на  $n$  интервала с продължителност  $t_i$ . При измерване с електромер минималната продължителност на интервала на дискретизация обикновено е 1 min. Затова е по-подходящо за прецизни изследвания да се използва анализатор на електрически величини, при който няма такова ограничение.

#### **Метод на консумирания ток**

Този метод се използва, когато е възможно да се измери само консумираният ток  $I_1$ . Не се препоръчва използването му при асинхронни двигатели с малка мощност, защото при празен ход консумираният ток е над 50% от номиналния.

Токът  $I_1$  се изменя линейно по отношение на натоварването за натоварвания от (50...100)% от номиналната мощност  $P_{2H}$  [12].

При натоварване под 50% от номиналното поради голямата реактивна съставка на тока,  $\cos\phi$  намалява, вследствие на което кривата на тока е нелинейна. В областта на ниските натоварвания консумираният ток не е възможно да се използва като критерий за натоварването на АД.

Когато захранващото напрежение  $U_1$  се различава от номиналното  $U_{1H}$ , е необходимо да се направи корекция и относителното натоварване се определя по формулите, дадени в табл. 1 в зависимост от вида на натоварването. Ако то се изменя на случаен принцип и се записва консумираният ток за определен период от време чрез интегриране се намира средната стойност на натоварването.

Когато за отделни интервали от време  $t_i$  токът е постоянен и е равен на  $I_{ji}$ , то относителното натоварване се определя чрез сумиране.

При използването метода на тока за определяне натоварването на АД в експлоатационни условия се получават резултати за натоварването, които са по-високи [6] в сравнение с действителното натоварване на АД. В [7] се предлага натоварването да се определя като се отчита токът на празен ход.

В [7] са посочени три разновидности на метода на тока с отчитане на тока на празен ход, които са представени на фиг. 1. При първата разновидност на метода се използва разликата между консумирания ток и тока на празен ход. Получаваните резултати за натоварването по този метод са по-малки от действителното натоварване [7].

Затова изчисляването на натоварването би могло да се извърши [7] като се вземе средноаритметичната стойност за натоварванията получени от двата метода – метода на тока и метода на тока с отчитане тока на празен ход.

За да се избегне подценяването на натоварването при използване на метода на тока с отчитане тока на празен ход, някои автори [4, 11] предлагат натоварването да се изчислява като се удвои консумирания ток.

Използването на тока на празен ход за определяне на относителното натоварване увеличава смущаващото въздействие на метода на тока върху технологичния процес, тъй като е необходимо изследване на празен ход, което в свързано с разкуплиране на АД от задвижваната работна машина.

За да се оцени точността на трите изброени по-горе разновидности на метода на тока за определяне на ОН и да се определи кой метод в какви случаи е подходящо да се използва трябва да се направят статистически изследвания на трите метода на тока. Това ще доведе до повишаване на точността при определяне на натоварването на АД в експлоатационни условия.

#### **Метод на хлъзгането**

Този метод е предпочитан в практиката, поради лесното и безопасно измерване на скоростта на въртене на двигателите. Необходимо е само да има свободен достъп до въртящия се вал. Точността на метода на хлъзгането е сравнително ниска, тъй като се допуска отклонение до 20% от номиналното

хлъзгане, изчислено с номиналната скорост на въртене, която е обозначена на табелката на двигателя.

Действителното хлъзгане  $s$  се определя като отношение на разликата между синхронната скорост и измерената скорост на въртене  $n$  към синхронната скорост.

Хлъзгането се изменя обратнопропорционално на квадрата на запазващото напрежение. При напрежение различно от номиналното е необходимо да се направи корекция в уравнението за изчисляване на относителното натоварване по метода на хлъзгането.

В случая относителното натоварване в проценти се изчислява по формулата [5]:

$$OH\% = \frac{s}{s_n \left( \frac{U_{1H}}{U_1} \right)^2} 100. \quad (1)$$

Действителните номинални стойности на тока, к.п.д. и скоростта на въртене на конкретен двигател е възможно да се различават значително от паспортните данни [9], означени на табелката на двигателя, по много причини. Чрез използване на номиналните данни на двигателя се намалява точността на тези методи. При ниски натоварвания отношението на консумирания ток към номиналния не е точен показател за относителното натоварване.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на направения анализ е разработена класификация на методите за определяне натоварването на асинхронните двигатели в експлоатационни условия, която показва кой метод в какви случаи е подходящо да се използва. Установено е, че в практиката най-често се използват трите метода на консумираната мощност, ток и хлъзгането, които са с различна точност. Затова е необходимо да се направи изследване на точността на трите метода при двигатели с различна мощност и различна скорост на въртене, за да може да се направи обосновка за правилния избор на метод за определяне на натоварването, като се отчетат възможностите на съвременната измервателна техника.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ангелов Н. А., Европейската програма за икономия на енергия "Предизвикателството на електродвигателите, Научни трудове на ВВМУ "Н.Й. Вапцаров", бр. 28, 2007, стр. 67-71.
- [2] Христова М., Методика за определяне натоварването и коефициента на полезно действие на асинхронните двигатели, Енергетика, 4/2011, с. 25...29.
- [3] Angers P., Comparison of Existing Standard Methods of Determining Energy Efficiency for Three-Phase Cage Induction Motors, EEMODS'09: Energy Efficiency in Motor Driven Systems, Nantes, France, 2009, pp 313-321.
- [4] Castrillón R., J. L. Oslinger, J. A. Palacios, In-Field Induction Motor Efficiency Determination Methods in the Scope of Efficiency-Based Maintenance, Proceedings of the 6th International Conference eemods '09: Energy Efficiency in Motor Driven Systems, Vol. 1, Nantes, FRANCE, 14-17 September 2009, pp. 285-293.
- [5] Determining Electric Motor Load and Efficiency, United States of America Department of Energy, Fact Sheet, Motor Challenge a program of US DOE, 1997.
- [6] Ferreira F., A. T. Almeida, Considerations on In-Field Induction Motor Load Estimation Methods, 18th Inter. Conf. on Electrical Machines (ICEM'08), Conf. Proc., Vilamoura, Portugal, Sept. 2008, pp. 1-8.
- [7] Hsu J. S., John D. Kueck, Mitchell Olszewski, Don A. Casada, Pedro J. Otaduy, and Leon M. Tolbert, Comparison of Induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods,

IEEE Transactions on industry applications, Vol. 34, No. 1, January/February 1998, pp. 117-124.

[8] <http://www.carbontrust.co.uk>, Motors and drives. Introducing energy saving opportunities for business, UK, The Carbon Trust, 2011, p. 38.

[9] Kral C., A. Haumer, C. Grabner, Consistent Induction Motor Parameters for the Calculation of Partial Load Efficiencies by Means of an Advanced Simulation Model, Engineering Letters, Vol. 18 Issue 1, 2010, p. 28-41.

[10] Kueck J. M., D. Olszewski Casada, J. Hsu, P. Otaduy, L. Tolbert, Assessment of Methods for Estimating Motor Efficiency and Load Under Field Conditions, Prepared by Oak Ridge National Laboratory, Managed by Lockheed Martin Energy Research Corp., for U.S. Department of Energy, under contract DE-AC05-96OR22464, January 1996.

[11] Lu B., T. G. Habetler, R. G. Harley, A Survey of Efficiency Estimation Methods of In-Service Induction Motors with Considerations of Condition Monitoring Requirements, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, no. 4, July/August 2006, pp. 924-933.

[12] McCoy G. A., J. G. Douglass, Energy Management for Motor-Driven Systems, Energy efficiency and renewable energy, U.S. Department of Energy, 2000, p. 123.

[13] Phumiphak T., C. Chat-uthai, Effective Estimation of Induction Motor Field Efficiency Based on On-site Measurements, 1st International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2004), 2004.

**За контакти:**

гл. ас. д-р инж. Миглена Христова, катедра “Електроснабдяване и електрообзавеждане”, Русенски университет “А. Кънчев”, Тел.: 082 888 659, E-mail: [msankova@uni-ruse.bg](mailto:msankova@uni-ruse.bg).

доц. д-р инж. Вяра Русева, катедра “Електроснабдяване и електрообзавеждане”, Русенски университет “А. Кънчев”, Тел. 082 888 616; E-mail: [vruseva@uni-ruse.bg](mailto:vruseva@uni-ruse.bg).

**Докладът е рецензиран**