

**СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА МЕТОДИТЕ ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНА  
ЕФЕКТИВНОСТ НА АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ В СТАНДАРТА IEC 60034-2-1  
I ЧАСТ**

**Пл. Никовски**

*Университет по хранителни технологии – Пловдив, Технически факултет  
гр. Пловдив, 4000, бул. "Марица" №26, e-mail: plmnn@uft-plovdiv.bg*

**COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR MEASURING THE ENERGY  
EFFICIENCY OF INDUCTION MOTORS IN THE STANDARD IEC 60034-2-1  
PART I**

**Pl. Nikovski**

*University of Food Technologies – Plovdiv, Engineering Faculty  
Plovdiv, 4000, bul. "Mariza" №26, e-mail: plmnn@uft-plovdiv.bg*

**ABSTRACT**

Electrical motors are everywhere around us. They can be found in almost every industrial process, domestic appliance, building services, office equipment, etc. This wide use makes them one of the most important aim of achieving energy savings. Current study includes an overview and comparative analysis of standard methods for determining losses and efficiency of polyphase asynchronous motors with squirrel-cage rotor, presented in new standard IEC 60034-2-1:2014. The results obtained are important for practical use, allowing to choose an appropriate method according to the specific conditions.

*Key words: standard methods, losses, efficiency, induction machines.*

**Въведение**

Електрическите двигатели са навсякъде между нас. Те могат да се открият в системите за сградна автоматизация, битова техника, офис оборудване, в промишлените електрозадвижвания [2,3] и т.н. Значителна част от двигателите използвани в съвременната промишленост са асинхронни двигатели с накъсо съединена роторна намотка. Оборотите на асинхронните двигатели се определят основно от честотата на захранващото напрежение и броят на полюсите, намалявайки незначително при натоварване. Те имат относително ниска цена, дълъг експлоатационен живот, висока надеждност и енергийна ефективност и са лесни за поддръжка [7]. Всички тези особености превръщат асинхронният двигател в един от най-често срещаните елементи на електрозадвижванията.

Настоящата работа има за цел да анализира особеностите на най-новите стандартизирани методи, подходящи за определяне на енергийна ефективност на трифазни асинхронни двигатели с накъсо съединен ротор. Вниманието е насочено основно към тези, които могат да се проведат при полеви условия (извън специализирана лаборатория), отговаряйки на нуждите от подходящи методи за решаване на различни практически задачи свързани с енергийна ефективност.

**IEC 60034-2-1:2014 модел на преобразуване на енергията в асинхронен двигател**

Към настоящия момент за определяне на загуби и коефициент на полезно действие (КПД) на трифазни асинхронни двигатели с накъсо съединен ротор (по нататък означавани с АД) се използват редица стандартизирани методи, повечето от които са описани в стандартите [10] и [11]. И двата стандарта са действащи. Съгласно [10] загубите в АД могат да се отнесат към следните пет групи:

1. Загуби в статорната намотка. Те се означават с  $P_s$  и се определят със зависимостта:

$$P_s = 1,5 \cdot I^2 \cdot R \quad (1)$$

където,  $I$  е средноаритметичната стойност от трите линейни тока,  $R$  е средноаритметичната стойност от активните съпротивления, измерени между двойките изводи на статорната намотка.

2. Загуби в роторната намотка. Те се означават с  $P_r$  и се определят с зависимостта:

$$P_r = P_1 - P_s - P_{fe} \cdot s, \quad (2)$$

където

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{f}, \quad (3)$$

$P_1$  е активната електрическа мощност, консумирана от АД,  $P_{fe}$  са загубите в стоманата,  $s$ ,  $p$  и  $n$  са съответно хлъзгането, броят на двойките полюси и ъгловата скоростта на вала на АД, а  $f$  е честота на захранващото напрежение.

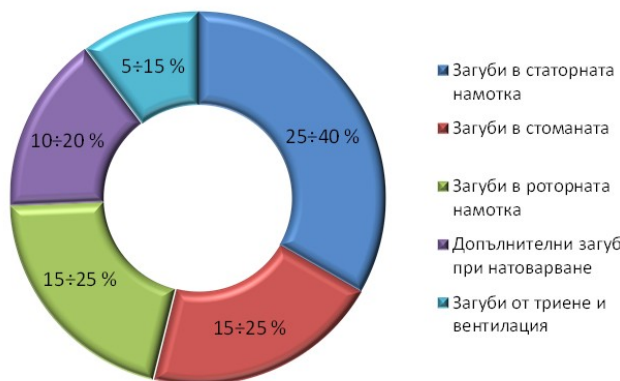
Сумата от загубите в двете намотки на АД се означава с  $P_L$  и определя така наречените загуби от натоварване (load losses). От температурата на флуида  $\theta_c$ , охлаждащ машината (най-често въздух) непосредствено зависи нейното прегряването, а следователно и големината на  $P_L$ . За да се осигури сравнимост на резултатите получени при различни тестове и изпитвания стандартът предвижда тези загуби да се определят след привеждане на съпротивленията на намотките и хлъзгането (непосредствено зависещо от съпротивлението на роторната намотка) към температура 25 C°.

3. Загуби в стоманата  $P_{fe}$  (iron losses). Тук се включват загубите в магнитната система на машината (от хистерезис и вихрови токове), както и загубите създадени от магнитното поле на АД в останалите метални части, при работа без товар.

4. Загуби от триене и вентилационни загуби  $P_{fw}$  (friction and windage losses). Тук се включват загубите от триене в лагерите и въздуха, както и енергията консумирана от други механизми, съставни части на АД.

Сумата от загубите в стоманата, загубите от триене и вентилационни загуби определя така наречените постоянни загуби  $P_c$  (constant losses). Всички те се намират чрез изпитване на АД без товар (No-load test). При него АД работи в двигателен режим, без да отдава полезна механична мощност.

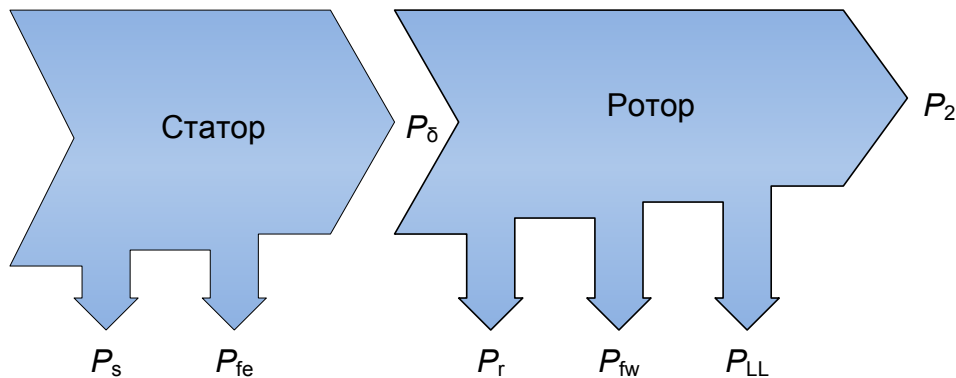
5. Допълнителни загуби при натоварване (additional load losses, stray-load losses)  $P_{LL}$ . Това са загуби, различни от определените по-горе, възникващи при натоварване на АД (основно загуби в магнитната система на машината и други метални елементи). Липсата на



достатъчно точни аналитични модели и факта, че допълнителните загуби при натоварване са относително малка част от загубите в АД съществено затруднява определянето им. На фиг. 1 е показано едно типично разпределение на загубите в АД.

Разликата  $P_T$  на електрическата мощност постъпваща в АД и полезната механична мощност  $P_2$  получена на вала, еквивалентна на сумата от загубите при натоварване, постоянните загуби и допълнителните

Фиг. 1. Разпределение на загубите в АД.



Фиг.2. Енергийна диаграма на АД, свързваща изходната мощност, входната мощност и загубите дефинирани в IEC 60034-2-1:2014.

загуби при натоварване

$$P_T = P_1 - P_2 = P_L + P_c + P_{LL} \quad (4)$$

определя пълните загуби (total losses) в АД.

Индириктните методи за определянето на енергийна ефективност на АД в IEC 60034-2-1:2014 използват един и същ модел на процеса преобразуване на енергията. Най-общо той може да се опише с енергийната диаграма, показана на фиг.2. При нейното построяване са направени две съществени допускания. Първо е прието, че загубите в стоманата (определени при работа на АД без товар) са изцяло съсредоточени в статора на машината. Второ е прието, че допълнителните загуби при натоварване създават допълнителен спирачен момент подобно на механичните загуби, редуцирайки механичната мощност на вала. Следователно за електромагнитната мощност  $P_\delta$  предавана от статора на ротора през въздушната междина може да се запише:

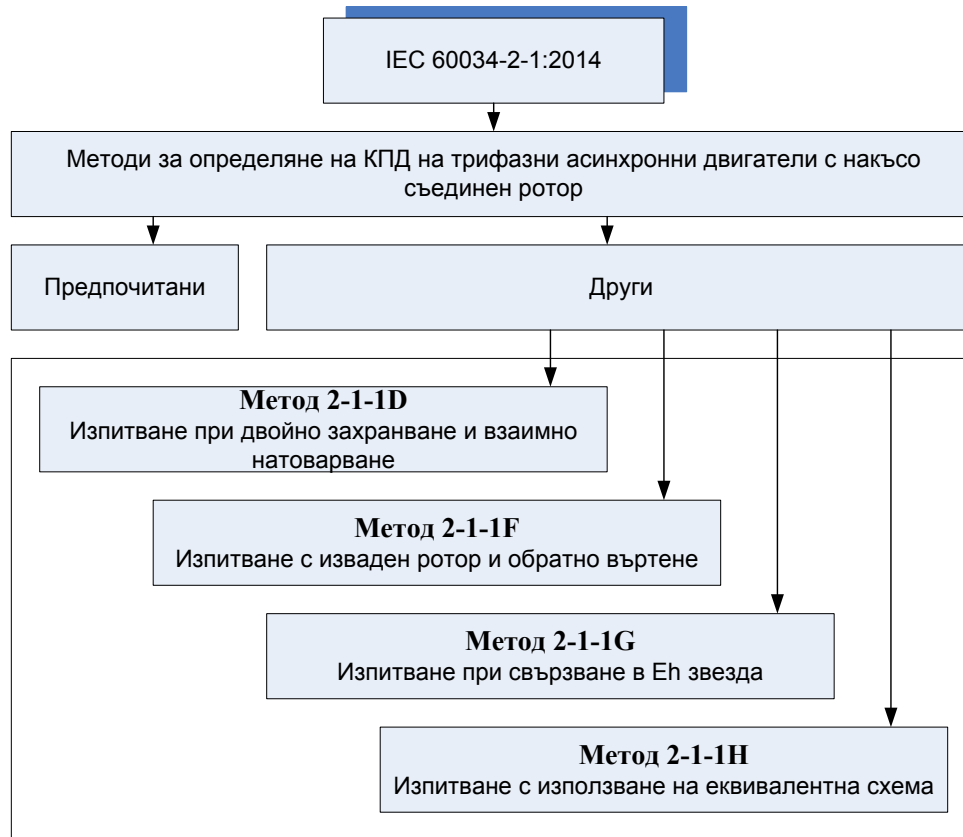
$$P_\delta = P_1 - P_s - P_{fe}. \quad (5)$$

### Класификация на методи за изпитване на АД

Последната редакция на IEEE Std 112 е публикувана през 2004 г. от Institute of Electrical and Electronics Engineers. Необходимостта от актуализация съобразена с новите тенденции [4,5,8] и натрупания до момента опит [6,9] е основна причина International Electrotechnical Commission да публикува през месец юни 2014 г. второ издание на стандарта IEC 60034-2-1. В него методите за изпитване са разделени на две големи групи (фиг.3):

- предпочитани методи за изпитване (Preferred testing methods). Напълно определени са три самостоятелни метода за изпитване на АД. Избора на конкретен метод е фиксиран от типа на асинхронния двигател (еднофазен или трифазен) и неговата номинална изходна мощност. Предпочитаните методи за изпитване осигуряват висока точност на получените резултати, тъй като за определяне на всички компоненти на загубите се използват експериментални данни. Но това има своята цена: строгото спазване на множество ограничения, значителния обем от експериментални изследвания, необходимостта от специфично и скъпо лабораторно оборудване затруднява, а понякога прави и невъзможно тяхното използване. Отговаряйки на нуждите от опростени стандартизирани методи за определяне на основни и специфични параметри, касаещи енергийната ефективност на АД

стандартът [10] предлага втора група от методи - Testing methods for field or routine-testing, които по нататък условно ще бъдат наричани други методи за изпитване.



**Фиг.3. Методи за изпитване на трифазни асинхронни двигатели с накъсо съединен ротор в IEC 60034-2-1:2014.**

- други методи за изпитване. Тази група включва четири самостоятелни метода за изпитване на АД. В основата на всеки един от тях стои опростен физически модел на асинхронната електрическа машина, чиито параметрите не винаги са определени от експериментални данни [1,10]. В резултат другите методи за изпитване не винаги притежават точността на предпочитаните методи, но позволяват необходимата информация за енергийна ефективност на АД да се получи по-бързо и по-лесно.

Стандартът [10] не ограничава прилагането на отделните методи от тази втора група за определен тип двигател или номинална изходна мощност. Това налага да се открият и посочат онези определящи особености, предимства и недостатъци на методите на изпитване, които позволяват за всеки конкретен случай да се избере най-подходящия от тях.

### **Преглед на другите методи за изпитване в IEC 60034-2-1:2014**

1. Метод 2-1-1D - Изпитване при двойно захранване и взаимно натоварване (Dual supply back-to-back test). За реализиране на този метод са необходими два идентични АД. Двете машини се свързват механически, след което първата от тях се присъединява към захранващ източник с номинално напрежение и честота. Честотата и напрежението приложено на втората машина се регулират до по-ниски стойности (запазвайки отношение на двете величини), което позволява тя да работи като генератор. Тогава при работа в номинален режим, КПД може да се определи от половината на техните общи загуби

$P_1=(P_1-P_2)/2$  и средната стойност от входната мощност  $P_1$  на двигателя и изходната мощност  $P_2$  на генератора:

$$\eta = 1 - \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \quad (6)$$

По време на изпитването се следят и записват токовете, напреженията и техните честоти, активните електрически мощности и хлъзганията на двете машини, както и температурата на охлаждащата среда.

2. Метод 2-1-1E - Изпитване при единично захранване и взаимно натоварване (Single supply back-to-back test). Този метод е близък до разгледания по-горе, но е приложим само за асинхронни машини с навит ротор.

### Заклучение

В тази първа част на статията са въведени основни понятия и е съставен енергиен модел на асинхронен двигател, върху който се базирани изследваните методи за определяне на коефициент на полезно действие. Представена е класификацията на методите в новото издание на стандарта IEC 60034-2-1. Общият преглед и анализ стартира с метод 2-1-1E и продължава в следващата втора част, в която са представени и получените резултати.

### Литература

1. ГОСТ Р МЭК 60034-2-1-2009. Машини електрически вращающиеся. Часть 2-1. Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин (за исключением машин для подвижного состава), Стандартинформ, 58.
2. Марков, Б., 2009. Автореферат на тема „Намаляване на натоварванията в мостов кран чрез асинхронно електрозадвиждане с електрическа връзка между роторите”, СНС „Транспортна техника и логистика”, 2009.
3. Марков, Б., 2011. Изчисляване на роторните токове, електромагнитният момент и избор на съпротивление в многодвигателно асинхронно електрозадвиждане с електрическа връзка между роторите на асинхронните двигатели, „Хранителна наука, техника и технологии 2011”, Пловдив, 14-15 Октомври, 369-374.
4. Регламент (ЕО) №640/2009 на Комисията за прилагане на Директива 2005/32/ЕО на Европейския парламент и на Съвета по отношение на изискванията за екопроектиране на електродвигатели, Официален вестник на ЕС, 23.07.2009 г., 26-34.
5. Христова, М., В. Русева, 2013. Сравнителен анализ на нормативни документи за енергийна ефективност на асинхронните електродвигатели, Научни трудове на РУ, том 52, серия 3.1, Русе, Издателски център на Русенския университет, 48-55.
6. Almeida, A. F. Ferreira, J. Busch, P. Angers, 2001. Comparative Analysis of IEEE 112-B and IEC 34-2 Efficiency Testing Standards Using Stray Load Losses in Low-Voltage, Three-Phase, Cage Induction Motors, IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conf., 13-19.
7. Almeida, A., H. Falkner, J. Fong, 2014. EuP Lot 30: Electric Motors and Drives, ISR – University of Coimbra, 40.
8. Brunner C., P Waide, M Jakob, 2011. Harmonized Standards for Motors and Systems. Global progress report and outlook, 7th International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems, 13.
9. Cao, W., 2009. Comparison of IEEE 112 and new IEC standard 60034-2-1, IEEE Transactions on Energy Conversion, 24 (3), 802-808.
10. IEC 60034-2-1 Edition 2.0 Rotating electrical machines - Part 2-1 Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles), 2014, IEC International Electrical Commission.
11. IEEE Std 112 IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, 2004, IEEE Power Engineering Society, 79.