

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

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

В предходната част на тази статия бяха представени основни понятия, класификации и енергийния модел на асинхронен двигател, върху който се базирани изследваните методи за определяне на КПД в новото издание на стандарта IEC 60034-2-1. Започнатият по-рано преглед и анализ на методите продължава в настоящата част, която включва и съответните крайни резултати.

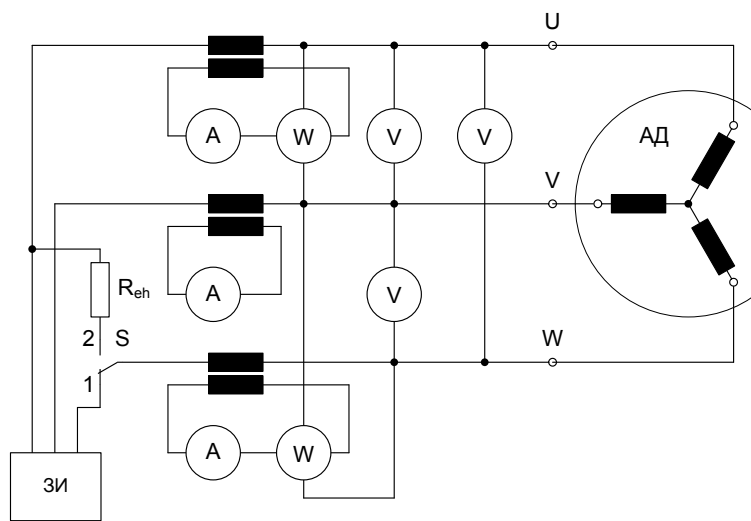
Преглед на другите методи за изпитване в IEC 60034-2-1:2014

3. Метод 2-1-1F - Изпитване с изваден ротор и обратно въртене (Summation of losses with additional load losses determined by test with rotor removed and reverse rotation test). Това е индиректен метод за определяне на КПД на АД, който включва три отделни теста:

-тест при ненатоварен двигател. Ненатовареният АД се свързва към регулируем трифазен източник на енергия. Последният осигурява симетрична система от напрежения с номинална честота и големина, която може да се променя от 30 % до 110 % от номиналното напрежение на АД. Провеждат се осем измервания, при които се регистрират напрежението, токът, консумираната активната мощност и съпротивлението на намотката непосредствено преди и след теста. Резултатите от теста се използват за определяне на постоянните загуби в АД.

-тест с изваден ротор. Изпитваният двигател се разглобява и се изважда ротора (монтирани остават всички елементи на конструкцията, в които е възможно да се индуцират вихрови токове). Статорът на АД се свързва към регулируем трифазен източник на енергия. Той осигурява симетрична система от токове с номинална честота и големина, която може да се променя от 25% до 150 % от номиналния ток на АД. Провеждат се шест измервания, при които се регистрират консумираната активната мощност, големината на тока,

съпротивлението и температурата на намотката (температурата на намотката може да се определи косвено, като се измери нейното съпротивление).



Фиг.1. Схема на свързване на АД при провеждане на тест Eh звезда.

- тест с обратно въртене. Изпитваният АД се сглобява и се присъединява към вала на спомагателен двигател. Той развърта АД до синхронна скорост в посока обратна на магнитното поле, създадено от собствената му намотка. Без да се прилага напрежение на статора на АД се измерва мощността на задвижващия двигател. След това статорът се захранва с напрежение, при което токът достига всяка една от шестте стойности, получени при изпитването с изваден ротор. Регистрират се: токът, консумираната активна мощност, съпротивлението и

температурата на намотката, както и мощността на спомагателния двигател.

Резултатите от последните два теста се използват за определяне на допълнителните загуби при натоварване.

4. Метод 2-1-1G - изпитване при свързване в Eh звезда (Summation of losses with additional load losses determined by Eh-star method). Това е индиректен метод за определяне на КПД на АД, който включва два отделни теста:

-тест при ненатоварен двигател (описан по-горе), резултатите от който се използват за определяне на постоянните загуби в АД.

-тест при свързване в Eh звезда. Изпитването започва с присъединяване на ненатоварения АД към схемата показана на фиг.1. Тя включва технически средства за измерване на напрежение, ток и активна мощност. Резистора R_{ch} може да се настройва (за да се поддържа определено съотношение между токовете с права и обратна последователност), а неговата типична стойност се определя от номиналното напрежение и ток на АД. Първоначално, ключът S се поставя в позиция 1 и АД се стартира при понижено напрежение (25÷40 % от съответното номинално напрежение на намотката) на захранващия източник ЗИ. След развъртане на двигателя, S се превключва в позиция 2. Променяйки големината на захранващото напрежение се настройват шест различни стойности на токът в фаза V, равномерно разположени между 75 % и 150% от съответния номинален ток на намотката. За всяка експериментална точка се измерват и регистрират показанията на измервателните уреди и честота на въртене на вала n . Измерва се и се записва стойността на съпротивлението R_{WV} между изводите W и V на намотката непосредствено преди и след изпитването.

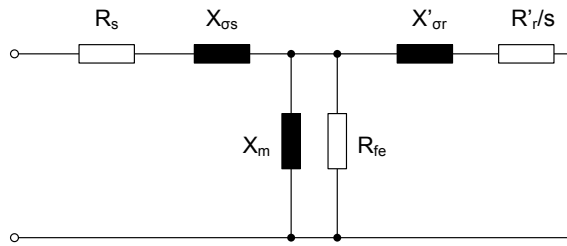
За да се получат точни резултати хлъзгането на АД не бива да превишава удвоената си номинална стойност или казано по друг начин:

$$n_{syn} - 2 \cdot n_{syn} - n_N < n \quad (1)$$

където с n_{syn} и n_N са означени съответно синхронната и номиналната стойност на честотата на въртене на вала на АД.

Резултатите от последния тест се използват за определяне на допълнителните загуби при натоварване.

5. Метод 2-1-1Н - изпитване с използване на еквивалентна схема (Determination of efficiency by use of the equivalent circuit parameters). При този метод всяка една от фазите на АД (по отношение на входното напрежение и ток) се представя с показаната на фиг. 2



Фиг.2. Еквивалентна схема на фаза на АД.

Т-заместваща схема. Нейните параметри се определят чрез провеждане на два отделни теста:

- тест при ненатоварен двигател (описан по-горе).
- тест при понижена честота. Преди началото на теста, ротора на АД се блокира. Статорната намотка се свързва към регулируем трифазен източник на напрежение. Избират се поне три различни честоти в интервала от 25 % до 50 % от номиналната. За всяка честота, напрежението на източника се регулира до момента, в който токът през намотката достигне номиналната си стойност. По време на теста се измерват и регистрират: приложеното напрежение, големината на тока, честотата, консумираната активна мощност, съпротивлението и температурата на статорната намотката (която по време на теста не бива да нараства с повече от 5 К), температурата на охлаждащата среда.

КПД на АД при различни натоварвания се определя по изчислителен път с помощта на еквивалентната схема.

Стандартът IEC 60034-2-1:2014 допуска вместо тест при понижена честота да се проведе тест при номинална честота. Той включва два етапа. Първоначално ротора е блокиран и АД се захранва с понижено напрежение при номинална честота. При този тест се измерват и регистрират: приложеното напрежение, големината на тока, честотата, консумираната активна мощност, съпротивлението и температурата на статорната намотката, температурата на охлаждащата среда. След това ротора се освобождава. АД се захранва с номинално напрежение и честота и се натоварва частично. При този опит се измерват и регистрират: приложеното напрежение, големината на тока, консумираната активна мощност, хлъзгането, съпротивлението и температурата на статорната намотката, температурата на охлаждащата среда (Съществува и друг вариант на последния опит, който е свързан с определяне на времеконстантата на фазите на АД, но тук няма да се спираме на него).

Стандартът IEC 60034-2-1:2014 допуска предпочитаните методи да се разглеждат като други методи на изследване, когато се използват при условия различни от специфицираните [1]. В настоящата работа тази възможност не се анализира.

Особености, предимства и недостатъци на методите за изпитване

Изключвайки 2-1-1А и 2-1-1D, методите за определяне на КПД η на АД в IEC 60034-2-1:2014 са индиректни: вместо да бъде измерена изходната мощност P_2 , тя се замества с разликата на входната електрическа мощност P_1 и общите загуби P_T :

$$\eta = \frac{P_1 - P_T}{P_1} \quad (2)$$

Индиректните методи могат да осигурят по-голяма точност при определяне на КПД на АД [2,5]. Те позволяват отделните загуби да се коригират и привеждат към една и съща температура на охлаждане (25 С°), давайки възможност да се обработват и сравняват резултати, получени при различни условия.

Методите 2-1-1А и 2-1-1В изискват непосредствено измерване на изходната механична мощност на АД. Решаването на тази задача към настоящият момент е сложно и скъпо (обикновено се използва динамометър, с обхват 25÷125 % от номиналния товар на машината). Прилагането на тези методи в полеви условия е трудно, а понякога и невъзможно.

При методът 2-1-1D, необходимостта от измерване на механична мощност е решен, като се използва втори двигател от същият тип. Той се захранва от регулируем захранващ източник, способен да отдава реактивна и приема активна мощност.

При методите 2-1-1А, 2-1-1В и 2-1-1D изпитването на двигателя се провежда при реално физическо натоварване (подобно на работното).

За да се приложи метод 2-1-1F е необходим спомагателен двигател с мощност не по-малка от пълните загуби на изпитвания АД и не по-голяма от тяхната петкратна стойност. Той осигурява въртене със синхронна скорост. Самата процедура включва два отделни теста, първият от които е свързан с разглобяване на АД и изваждане на неговия ротор. Условията, при които се определят допълнителните загуби се различават от тези, при които машината работи (обикновено те са по-големи).

Нуждата от динамометър или спомагателен двигател е избегната при метод 2-1-1G. Тук двигателят се захранва с несиметрична система от напрежения, а валът му остава свободен. Допълнителните загуби при натоварване се намират след изчисляване на големината на токовете с обратна последователност. Методът 2-1-1G е бърз, лесен и евтин за

Таблица 1. Необходимо оборудване, средства за измерване и специфични операции, при използване на другите методи за изпитване в IEC 60034-2-1:2014.

Метод 2-1-1	D	F	G	H _(LF)	H _(RF)
Необходимо оборудване					
<i>Механичен товар</i>	X	X	X	X	V
<i>Втори двигател</i>	V	V	X	X	X
<i>Прекъсвач и регулируем резистор</i>	X	X	V	X	X
<i>Необходимост да се регулира напрежението на източника</i>	V	V	V	V	V
<i>Необходимост да се регулира честотата на източника</i>	V	X	X	V	X
Необходими средства за измерване					
<i>Напрежение, ток, мощност, честота</i>	V	V	V	V	V
<i>Момент</i>	X	X	X	X	X
<i>Съпротивление на намотката</i>	X	V	V	V	V
<i>Температура на намотката</i>	X	V	X	V	V
<i>Честота на въртене на двигателя</i>	X	X	V	X	X
<i>Хлъзгане</i>	V	X	X	X	V
<i>Температура на околната среда</i>	V	V	V	V	V
Операции					
<i>Механично присъединяване</i>	V	V	X	X	V
<i>Монтаж/демонтаж на ротора</i>	X	V	X	X	X
<i>Блокиране на ротора</i>	X	X	X	V	V
Забележки: - по време на тестовете, промените на честотата на захранващото напрежение не бива да надхвърля ±0,1 %; - с H _(LF) и H _(RF) са означени варианти на метод 2-1-1H , включващи съответно тест при понижена и тест при номинална честота.					

изпълнение, но притежава следните по-важни недостатъци: допълнителните загуби при натоварване не се определят при реално натоварване на машината, математическата

обработка на резултатите е сложна, изпитването може да се проведе само, ако статорната намотка допуска свързване в звезда, необходим е допълнителен резистор, съобразен с мощността на двигателя.

В основния си вариант (който включва изпитване при понижена честота), методът 2-1-1Н не изисква допълнително оборудване като динамометър, спомагателен двигател или мощен резистор. Методът може да се приложи независимо от схемата на свързване на статорната намотка. При него, всяка една от фазите на АД се заменя с еквивалентна електрическа схема, съставена от шест елемента. Тяхната стойност се определя при изпитване на машината без натоварване и изпитване при намалена или номинална честота. Допълнителните загуби при натоварване се определят аналитично или експериментално с помощта на метод 2-1-1G или метод 2-1-1F.

Методът 2-1-1Н е бърз, лесен и евтин за изпълнение. За разлика от останалите методи той позволява да се получи модел на АД, подходящ както за определяне на работните характеристики, така и за числено моделиране на същият. Точността на този метод не е висока и зависи основно от това дали приведеното съпротивление на роторната намотка, индуктивност на разсейване на роторната намотка и допълнителните загуби при натоварване са достатъчно близки до действителните.

Въз основа на направения преглед и анализ на другите методи за изпитване в IEC 60034-2-1:2014 е съставена Таблица 1. В нея са обобщени основните изисквания към оборудването, средствата за измерване и специфичните операции за всеки един от тях.

Заклучение

Направеният преглед и анализ показва, че избора на метод за полево определяне на коефициент на полезно действие на асинхронен двигател в общия случай е задача, чието решение не винаги е еднозначно. Независимо от това, следва да се обърне специално внимание на методите 2-1-1G и 2-1-1Н, които в общия случай не изискват присъединяване на механичен товар или измерване на механична мощност (въртящ момент). Първият метод се налага все по убедително в практиката, а изследванията на неговото приложение са насочени към възможността, съответния тест да се провежда без резистор [3,4]. Интересът към използване на втория метод също нараства. Това се дължи главно на повсеместното разпространение на честотни инвертори и спадането на тяхната цена.

Литература

1. 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.
2. IEEE Std 112 IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, 2004, IEEE Power Engineering Society, 79.
3. Koprivical B., M. Božić, M. Rosić, M. Bjekić, 2012. Application of Standard and Modified Eh-Star Test Method for Induction Motor Stray Load Losses and Efficiency Measurement, Serbian Journal Of Electrical Engineering, Vol. 9, No. 3, 377-391.
4. Machado A., J. Pacheco, M. Ferreira da Luz, C. Neves, R. Carlson, 2008. Stray Load Losses Calculation Routine based on the Eh-Star Method, International Conference on Electrical Machines, Vilamoura, Portugal, 6 - 9 Sept., 1-4.
5. Understanding Energy Efficient Motors (brochure). Electrical apparatus service association, 30.