

ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2024

ВИСОКОЕФЕКТИВЕН АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ ЗА ИНДУСТРИАЛНИ ПРИЛОЖЕНИЯ С НЕПРЕКЪСНАТ РЕЖИМ НА РАБОТА

Свилен Рачев, Янко Такавидов

HIGH EFFICIENCY INDUCTION MOTOR FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS WITH CONTINUOUS RUNNING DUTY CYCLE

Svilen Rachev, Yanko Takavidov

Abstract. The paper focuses on a newly designed three-phase induction electric motor for continuous duty cycle operation S1 with application mainly in industry. Electric drives of pumps, fans, compressors, conveyors, as well as control drives in production processes operate in this duty cycle. The main features are presented. The problems and solutions related to the sizing and optimization of the motor in the design according to different criteria and conditions are analyzed, with energy efficiency being the main determinant.

УВОД

За привеждане в движение на работните машини основен двигател се явява електрическият двигател и, следователно, основен тип задвижване се явява електрическото задвижване, или съкратено електрозадвижване.

Понастоящем е налице повсеместна ориентация към енергийно-ефективни технически решения глобално в света и Европа и в тази връзка развитието на това направление по отношение на електропотребление с оглед оптимизацията на електроенергийните разходи. Прилагането на оптимално в това отношение електрозадвижване, чийто основен компонент се явява електрически двигател, гарантира не само енергийно-ефективната работа на цели системи, но и ниски разходи за електроенергия за индустрията. С други думи – най-скъпата енергия в индустрията е ненужно консумираната и оптималното електрозадвижване ще гарантира не само енергийно-ефективна работа на дадена система, но и ниски разходи за електроенергия [1].

Създаването на всеки механичен агрегат понастоящем е свързано непосредствено с проектирането на електрообзавеждането. При това трябва да се познават добре механообзавеждането и технологиите, способите за регулиране на скоростта, изчисляване на преходните процеси на електрозадвижването, изборът на мощността на електрическите двигатели.

Целесъобразното проектиране на въртящи електрически машини е основа за постигане на локална и глобална електрическа енергийна ефективност.

НЯКОИ СЪОБРАЖЕНИЯ

Капрони АД – гр. Казанлък е водещ производител на хидравлични елементи и системи с приложение в мобилното и стационарното индустриално оборудване. Една иновация на фирмата е разработването на променливотокови електрически двигатели с евентуално прилагане на честотно регулиране и векторно управление [2].

Съвременното електрическо задвижване се развива главно в следната посока – опростяване на преводния механизъм между електрическия двигател и работната машина. Това се постига главно чрез използване на електрически двигатели, които позволяват регулиране на честотата на въртене, с което се избягва усложняването на предавателните механизми [3].

Регулиране на честотата на въртене се нарича принудителното изменение на скоростта на електрозадвижването. Понятието „регулиране на скоростта” не следва да се смесва с естественото изменение на скоростта, възникващо в електрозадвижването поради изменението на натоварването на вала на работещата машина. Регулирането на скоростта се осъществява с допълнително въздействие върху задвижващия електрически двигател или системата от предавки към производствения механизъм. Това въздействие може да бъде извършено от човека или от специално автоматично устройство [4]. В историческото развитие на задвижванията механичните способности за регулиране са били първата стъпка при прехода от нерегулируеми към регулируеми задвижвания. Понастоящем преобладава електрическото регулиране, имащо редица преимущества по отношение на технически и икономически показатели. При електрическо регулиране стремежът трябва да е насочен към това, характеристиките в целия диапазон да имат голяма твърдост, а електрическият двигател да притежава

достатъчна претоварваща способност. Електрическият способ за регулиране създава широки възможности за автоматизация на процеса на регулиране и позволява да се елиминират механичните регулиращи устройства и по този начин да се повиши надеждността на работа на установките и да се опрости тяхната конструкция.

Между другото, следва да се отбележи, че за самовентилирани електрически двигатели понижаването на честотата на въртене трябва да съответства на намалението на допустимите загуби в тях. При ниски скорости тези електрически двигатели трябва да работят при токове, по-малки от номиналния, а следователно, и допустимият момент се намалява според понижението на скоростта.

Динамичните натоварвания, възникващи при пускане и спиране на електрозадвижванията, увеличават загубите в двигателя, но понеже те са кратковременни в сравнение с продължителността на работа в установен режим, тяхното влияние върху загряването на електрическия двигател е нищожно. Затова в много случаи по условията за загряване може да се допусне кратковременно, че моментът на електрическия двигател е много по-голям от номиналния.

Освен загряването има и други фактори, които ограничават допустимото претоварване на електрическите двигатели – за всеки съществува пределна стойност на момента, допустим по условията за нормална работа на електрическия двигател, превишаването на която не трябва да става даже кратковременно. Точно това отношение на максимално допустимия момент спрямо номиналния се нарича претоварваща способност на електрическия двигател.

Особеностите на гамата променливотокови електрически двигатели АТМ е, че е постигната максимална унификация на използваната комплектация при изпълнението на изделия в обикновено изпълнение IE1 (Standard Efficiency – стандартна ефективност) и с енергиен клас IE2 (High Efficiency – висока ефективност). Наличните вече конструкции за различните типове изделия от базовата гама са предпоставка за реализиране и на енергиен клас IE3 (Premium Efficiency – първокласна ефективност). Електрическите двигатели с означение АТМ се изпълняват със стандартни и специални форми на изпълнение според предназначението им, като при различните комбинации не се променят присъединителните размери на базовите форми на изпълнение. При всички изделия тялото и лагерните щитове са отляти от алуминиева сплав. Всички изпълнения са вентилирани с

изключение на тези, работещи потопени в маслен резервоар. Възможни са и по-специални изпълнения, като:

- тропическо изпълнение;
- със степен на защита IP55 или IP56;
- за друго захранващо напрежение и честота;
- за режими на работа, различни от S1;
- с технически параметри, различни от тези на базовите изпълнения;
- с втори изходящ край на вала;
- изделия за т.нар. „мокри“ изпълнения (за работа потопени в хидравлично масло).

Международната електротехническа комисия (IEC – International Electrotechnical Commission) е организация със седалище в Женева, която публикува и популяризира в световен мащаб механичните и електрическите стандарти за електрически двигатели, наред с други документи. IEC използва обозначения (категории) на работни цикли (режими) S1 ... S10, за да се опишат условията на работа на електрическите двигатели – IEC 60034-2-1:2024 [5].

Режимите на електрическите двигатели, освен уточняването на работните им параметри и работните цикли, определят също така повишаването на температурата (клас на изолация), размера на рамката (физическите размери на електрическия двигател), типа на корпуса, фактора на обслужване и т.н.

В типичните режими серийните електрически двигатели трябва да работят, докато надеждната работа на машината е гарантирана от производителя, ако електрическият двигател работи в режим, посочен в неговия паспорт при номиналния товар. Бързият отказ обикновено се дължи на факта, че електрическата машина е избрана, без да се вземе предвид необходимият номинален режим.

В режим S1 (continuous – непрекъснат) работят електрически двигатели за прилагане при помпи, вентилатори, компресори, конвейери, както и за управляващи задвижвания в производствените процеси. Този режим се характеризира с работа при постоянно натоварване без прекъсване и с достатъчна продължителност за достигане на топлинно равновесие (топлинното равновесие е достигнатото състояние, когато

повишаването на температурата на машината не варира с повече от 2K на час) [3].

СПЕЦИФИКИ НА ПРОЕКТИРАНИЯ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ДВИГАТЕЛ

Разглежданият асинхронен двигател е предназначен за режим на работа S1 според IEC, охлажда се чрез самовентилация – код IC01, снабден е с 64 импулсен енкодер за обратна връзка по скорост, интегриран в задния лагер, термичната защита е реализирана с термистор Pt1000 в статорната намотка (стандартна екипировка), а изолацията на статорната намотка има клас на топлоустойчивост H (180°C).

Проектирането е извършено със зададени вътрешен и външен диаметър на листовите, с определен брой и размери на статорните и роторните канали. Възможностите за вариране на независимите променливи са ограничени от условията за минимални габарити и маса, както и от технологични фактори.

По отношение на инерционния момент на ротора – известно е, че по-високите инерции на ротора увеличават консумацията на енергия при промяна на скоростта, при компактни размери инерцията на ротора е по-малка [1].

Частични оптимизационни задачи са решени при критерий максимален к.п.д. и ограничения за токовата плътност в статорната и роторната намотка. Тези ограничения са наложени, за да се постигнат допустими температури на намотките. Стойностите на к.п.д. на двигателя са на равнището на клас IE2 според IEC 60034-30. Определени са параметрите на заместващата схема, токовете в намотките, загубите, мощностите и др. Получените резултати позволяват да се оцени разпределението на магнитната индукция в участъците на магнитната верига, да се определят магнитният поток през въздушната междина и електромагнитният момент.

За номиналната скорост претоварващата способност на електрическия двигател се определя от кратността на максималния момент. Кратността на максималния момент обикновено е по-голяма от 2, при което статорният ток е над два пъти номиналния ток на двигателя.

Въздушната междина оказва най-голямо влияние върху стойността на намагнитващия ток на асинхронните двигатели. От своя страна намагнитващият ток е определящ за тока и загубите в

статорната намотка и за фактора на мощността. Изработването на асинхронни двигатели с оптимална въздушна междина зависи от конструкцията на лагеруването и от нивото на производствения процес. Избраната конструктивна схема и точността при механичната обработка на статорните и роторните пакети, лагерните щитове и вала създават възможността за постигането на малка и равномерна въздушна междина на двигателите.

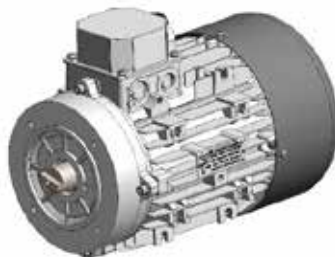
Машинното навиване и полагане на секциите, коефициентът на запълване на канала и качеството на импрегнацията на статорната намотка определят до голяма степен топлоотдаването и температурното състояние на намотката. От температурата зависи съпротивлението на намотката, загубите в нея и к.п.д.

Някои по-важни стойности на величини и параметри за разглеждания асинхронен двигател, произведен от Капрони АД, България, са дадени в Табл. 1, а на Фиг. 1 – общият му вид [2].

Таблица 1.
Стойности на величини и параметри за
разглеждания асинхронен двигател

Величини	
Описание	Данни
Тип	ATM 100LB-4
Енергиен клас	IE 2
Режим на работа	S1
Свързване (статор)	Y
Номинална мощност	3 kW
Номинално напрежение на статор	400 V
Работна честота	50 Hz
Брой двойки полюси	4
Въздушна междина	0.25 mm
Синхронна честота на въртене	1500 rpm
Честота на въртене на вала	1433 rpm
Номинално хлъзгане	0.04493
Инерционен момент на ротора	0.0065373 kgm ²
Номинален момент	19.99 Nm
Пусков момент	2.8 p.u.
Максимален момент	3.2 p.u.
Статорен ток	6.3 A

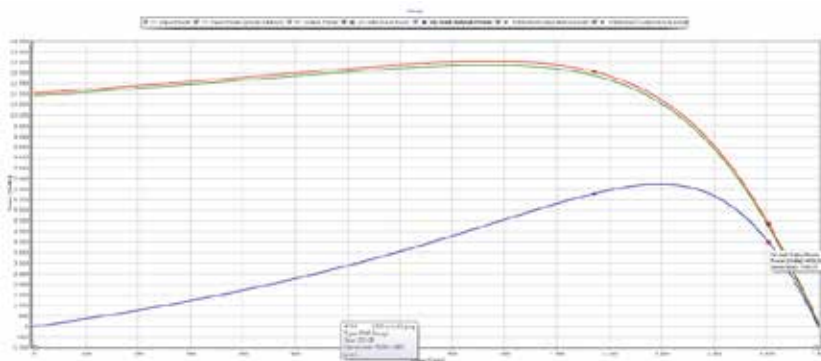
Величини	
Описание	Данни
Пусков ток	7.2 р.у.
Максимален ток	3.2 р.у.
Номинален к.п.д.	86.5%
Фазово съпротивление на статора	1.706 Ω
Приведено съпротивление на ротора	1.916 Ω
Реактивно съпротивление на разсейване на статора	1.294 Ω
Приведено реактивно съпротивление на разсейване на ротора	4.973 Ω
Магнетизиращо реактивно съпротивление (наситена система)	73.17 Ω



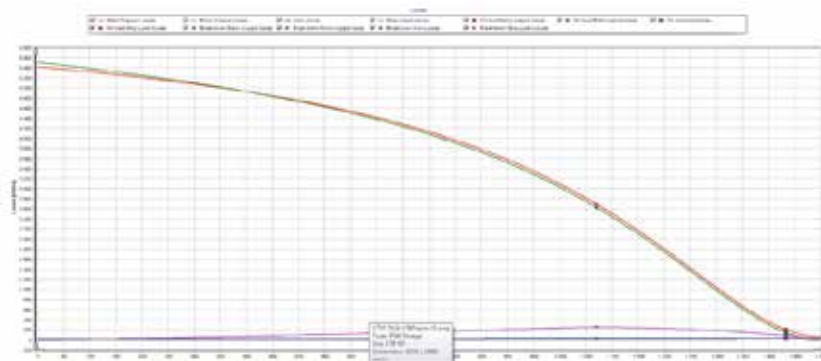
Фиг. 1. Общ вид на електрически двигател ATM 100LB-4.

ПОЛУЧЕНИ РЕЗУЛТАТИ

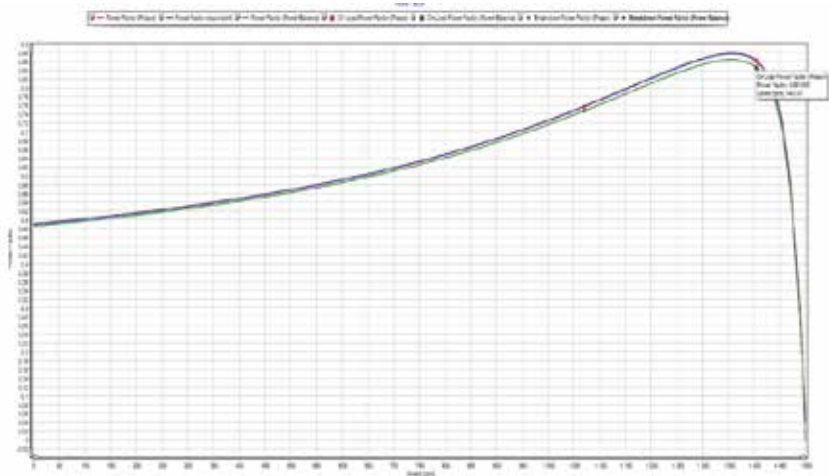
По-долу са представени в графичен вид на фиг. 2 ÷ фиг. 8 резултати за проектирания енергийно-ефективен асинхронен електрически двигател. Използван е целесъобразен софтуерен инструментариум за електрически машини – Ansys® Motor-CAD [6].



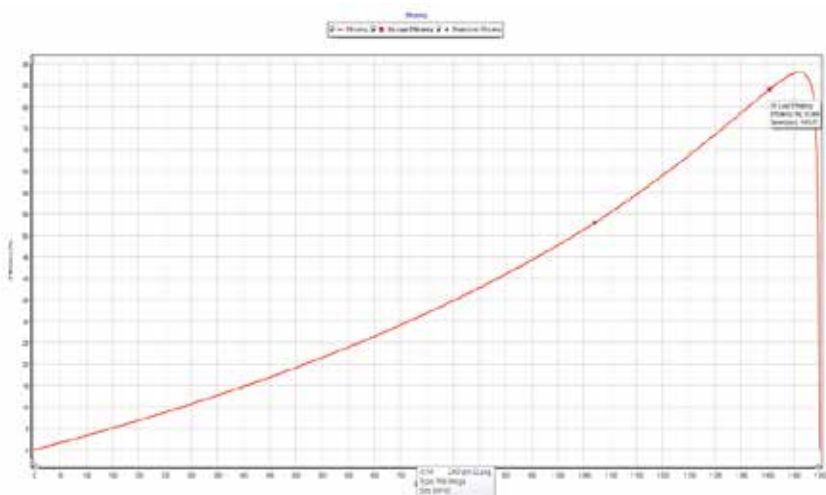
Фиг. 2. Мощност спрямо честотата на въртене за електрически двигател ATM 100LB-4 3 kW (в червен цвят – консумирана, в син цвят – полезна).



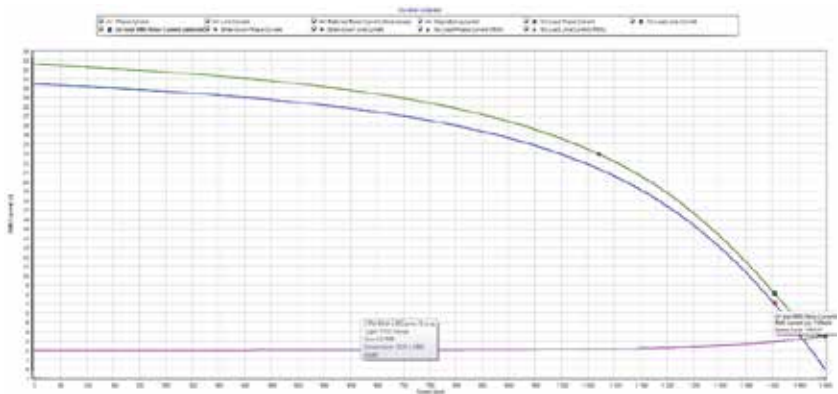
Фиг. 3. Загуби за електрически двигател ATM 100LB-4 3 kW (в червен цвят – загуби в медта на статорна намотка, в зелен цвят – загуби в медта на роторна намотка, в син цвят – загуби в стоманата, в розов цвят – блуждаещи загуби).



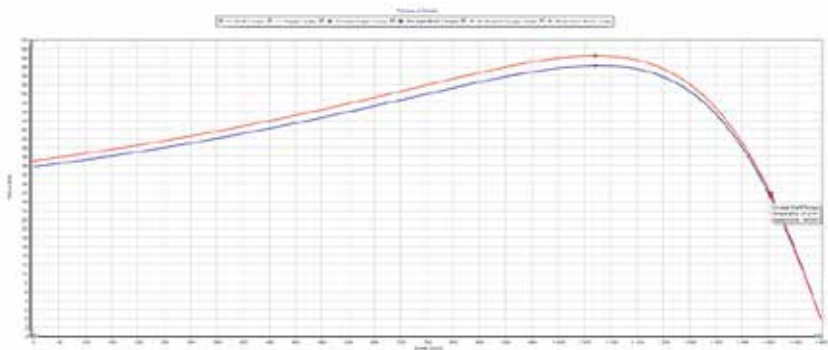
Фиг. 4. Коефициент на мощността спрямо честотата на въртене за електрически двигател ATM 100LB-4 3 kW.



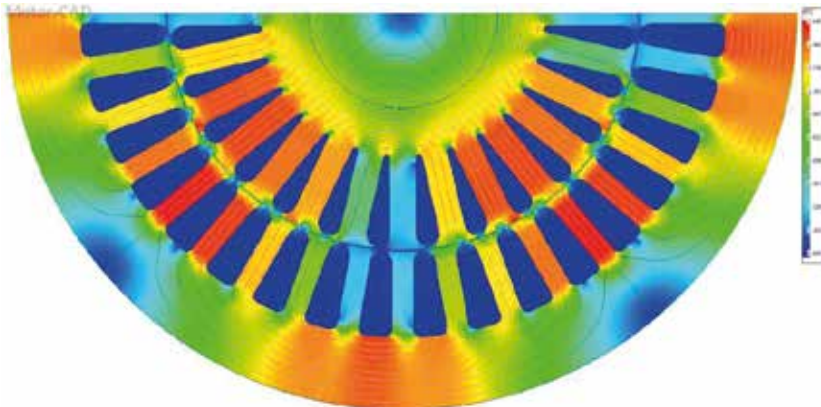
Фиг. 5. Коефициент на полезно действие спрямо честотата на въртене за електрически двигател ATM 100LB-4 3 kW.



Фиг. 6. Ефективна (средноквадратична) стойност на тока спрямо честотата на въртене за електрически двигател ATM 100LB-4 3 kW (в зелен цвят – линеен статорен ток, в син цвят – приведен роторен ток, в лилав цвят – намагнитващ ток).



Фиг. 7. Механична характеристика на електрически двигател ATM 100LB-4 3 kW (в червен цвят – момент във въздушната междина, в син цвят – на вала на двигателя).



Фиг. 8. Сила на магнитното поле (плътност на магнитния поток) в [Т] за електрически двигател ATM 100LB-4 3 kW.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На база на извършените изследвания се оформят следващите обобщаващи бележки. Създадени са модели за различна степен на натоварване. Следва да се отбележи, че експерименталните резултати имат голяма ценност, т.к. в резултат от анализирането им може да се установи доколко правилно е проектиран електрическият двигател, да се изяснят резервите за подобряване и евентуалните недостатъци.

Изборът на електрозадвижване не трябва да приключва само с разглеждане на възможността за получаване на определени механични характеристики. Необходимо е също да се оценят динамичните качества, икономическите показатели, надеждността и простотата на обслужване.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.tlmedia.bg/>
2. <https://caproni.bg/>
3. Рачев С., Д. Коева, Л. Димитров, Електрообзавеждане, Университетско издателство „Васил Априлов”, Габрово, 2022, ISBN 978-954-683-579-6, <https://epublish.tugab.bg/>
4. Чиликин М. Г., Общий курс электропривода, Москва, Энергия, 1971.
5. <https://iec.ch/>
6. <https://www.ansys.com/>

БЛАГОДАРНОСТИ

Реализацията на този доклад е с поддръжката на:

- Проект към Технически университет - Габрово 2404С 'Приложни математически изследвания за енергийна и икономическа ефективност на електрообзавеждането в условията на енергиен преход', финансиран целево от Министерство на образованието и науката на Република България.

- Проект BG05M2OP001-1.002-0023 Център за компетентност „Интелигентни, мехатронни, еко-и енергоспестяващи системи и технологии“, финансиран от Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“ на Европейския фонд за регионално развитие.

АВТОРИ

доц. д-р инж. Свилен Радославов Рачев, Технически университет - Габрово, Габрово, GSM: +359877168793, e-mail: sratchev@mail.com

маг. инж. Янко Милков Такавидов, Капрони АД, Казанлък, GSM: +359898969395, e-mail: iany_83@abv.bg