

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ТЕХНИЧЕСКИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, МЕТОДИТЕ ЗА УПРАВЛЕНИЕ И ВЪЗМОЖНОСТТА ЗА ЗАМЯНА НА АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ СЪС СИНХРОННИ РЕАКТИВНИ ДВИГАТЕЛИ

Христиан Панчев¹, Никола Македонски², Милен Дуганов³

^{1,2,3} Технически университет-Варна, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане”
email: ¹ hr_panchev@abv.bg, ² n.makedonski@tu-varna.bg, ³ m.duganov@tu-varna.bg

COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNICAL CHARACTERISTICS, CONTROL METHODS AND THE POSSIBILITY OF REPLACING ASYNCHRONOUS MOTORS WITH SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTORS

Hristian Panchev¹, Nikola Makedonski², Milen Duganov³

^{1,2,3} Technical University of Varna, “Department of Electric Power Supply and Equipment”
email: ¹ hr_panchev@abv.bg, ² n.makedonski@tu-varna.bg, ³ m.duganov@tu-varna.bg

Abstract

Electric motors account for 80% of electrical energy consumption in industrial plants. In most cases, asynchronous motors with a cage rotor are used, and in the last few decades there has been a tendency to control them with frequency converters and with relay contactor schemes, with the aim of better adapting to the needs of the load, reducing inrush currents and mechanical load on the driven mechanisms. Because of the need for more efficient motors, synchronous reluctance motors are increasingly being used. The report aims to analyze the technical characteristics, control methods and possibilities of replacing the conventional cage rotor asynchronous motors with the synchronous reluctance motors. A comparative analysis of the static and dynamic characteristics of the two motors was made in relation to the requirements of the driven loads.

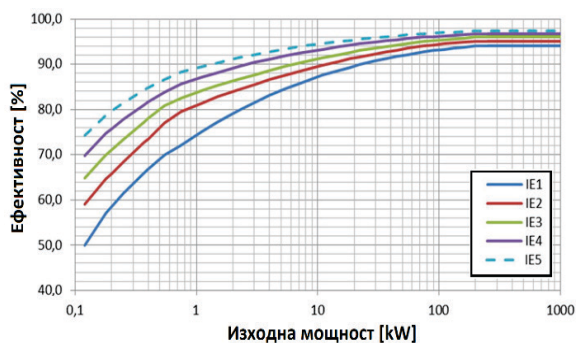
Keywords: asynchronous motors, synchronous reluctance motors, power efficiency, power theory

ВЪВЕДЕНИЕ

Тенденциите при избор на задвижващи единици (електрически двигатели) се обуславят освен от мощността, режима на работа, степента на защита и др., също и от наложените през последните години стандарти за енергийна ефективност, намаляне на нивата на въглеродни емисии и опазване на околната среда. В промишлени приложения с ниска мощност се използват различни видове електрически двигатели в зависимост от нуждите на системата. Прилагането на стандарти

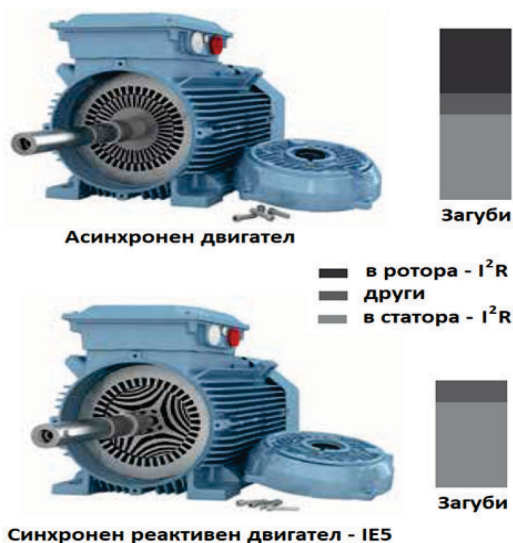
подпомага индустрията и органи-защите в повишаване на енергийната им ефективност и развитието на технологии за възобновяема енергия. Стандартът ISO 50001:2011 установява норми за ефективното използване на енергията в производствените предприятия, търговските вериги и публичния сектор. В тази връзка Международна Електротехническа Комисия – IEC, въвежда стандарта IEC TS 60034-30-2:2016 “Въртящи се електрически машини. Част 30-2: Класове на ефективност на променливотокови двигатели

с променлива скорост (IE код). Стандар-тът определя класовете на ефективност на едноскоростни електро-двигатели, които са с обявени данни съгласно IEC 60034-1 или IEC 60079-0, за работа със синусоидално напрежение. Този стандарт определя граничните стойности на к.п.д. въз основа на честотата, броя на полюсите и мощността на двигателя. На фиг. 1 графично е по-казано сравнението на ефективността при различните класове IE1 ÷ IE5 на електрическите двига-тели.



Фиг. 1. Нива на ефективност в стандарта за класификация на IEC TS 60034-30-2 (2016), криви за 50 Hz, 4-полюсни двигатели

На фиг. 2 е показан общия конструкти-вен изглед на стандартен асинхронен дви-гател и синхронен реактивен двигател [3]. Показано е и мястото на генериране на загубите. Ясно се вижда, че топлинни загуби в ротора на синхронния реактивен двигател почти отсъстват. Това се дължи на липсата на роторна намотка.



Фиг. 2. Загуби в двата типа двигатели.

Поради липсата на топлинни загуби в ротора, коефициента на полезно действие на този тип двигатели нараства с няколко процента. Например от каталожните дан-ни на голям производител на синхронни реактивни двигатели се вижда, че к.п.д. се променя от 93,7% до 97,2%, в зависимост от номиналната мощност, за двигатели с 1500 [мин.⁻¹], 50 [Hz] и 400 [V] линейно напрежение.

Изследването разглежда елктромеха-ничните свойства, енергетичните показа-тели за електрозадвижване на бутален компресор с два различни по клас на ефективност електрически двигателя, но с еднакви номинални напрежение и мощ-ност. Параметрите им са представени в таблица 1 и таблица 2.

Синхронен реактивен двигател	
Клас на ефективност	IE5
Номинална мощност	5,5 kW
Номинална честота	50 Hz
Номинално напрежение	0,4 kV
Номинален ток	11,7 A
Статорна намотка	Y
Ефективност	93,7 %
Номинални обороти	1500 r/min
Клас на изолация	F

Табл. 1. Номинални параметри на синхронен реактивен двигател

Асинхронен двигател	
Клас на ефективност	IE2
Номинална мощност	5,5 kW
Номинална честота	50 Hz
Номинално напрежение	0,4 kV
Номинален ток	10,49 A
Статорна намотка	Y
cosφ	0,88
Номинални обороти	2910 r/min
Клас на изолация	F

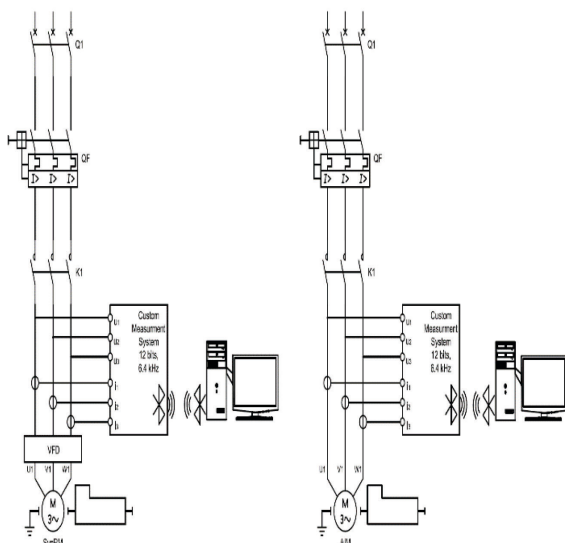
Табл. 2. Номинални параметри на асинхронен двигател

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАНОВКА

На фигура 3 е представена експери-менталната постановка за сравнителния анализ на двата типа електрически двига-тели. На същата фигура се вижда и систе-

мата за измерване на моментните стойности на напреженията и токовете. Системата за измерване има следните характеристики: резистивни делители за входните напрежения, токови трансформатори за токовете, аналогово-цифров преобразувател (АЦП) с 12-битова разделителна способност и честота на семплиране от 6,4 [kHz]. Системата също има микроконтролер за управление на АЦП, запазване на данните във временни буфери и bluetooth комуникация с персонален компютър. Данните са обработени на персонален компютър, чрез авторски специализиран софтуер, самите те са моментните стойности на измерваните електрическите величини.

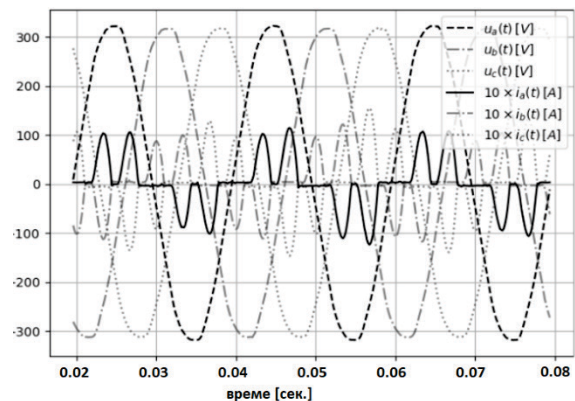
Като товар на изследваните двигатели се използва индустриален бутален компресор, притежаващ два чугунени цилиндъра. Коляновият вал на буталния компресор се задвижва от ремъчна предавка. Номиналната честота на въртене на коляновия вал на компресора е 1250 об/мин, а максималното налягане в резервоара е 11 бара. Ремъчната шайба на компресора служи едновременно като маховик и като вентилатор за охлаждане на цилиндрите. Компресорът е оборудван с резервоар с обем 270 литра при производителност 827 [l/min]. Теглото на компресорната система е 210 кг.



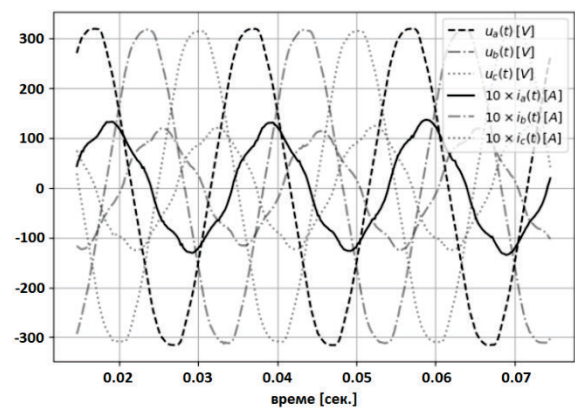
Фиг. 3. Експериментална постановка.
Синхронен реактивен двигател – *отляво*.
Асинхронен двигател – *отдясно*.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

На фиг. 4 и на фиг. 5 се вижда, че захранващото напрежение и при двата експеримента е едно и също, по форма и по стойност. Формата на тока, консумиран от регулатора на скоростта (РС), управляващ синхронния реактивен двигател (СРД) се дължи на факта, че първия блок от силовата схема на РС е трифазен мостов изправител по схема Ларионов. Формата на тока на асинхронния двигател е несинусоидална. Замърсяването с хармоници на захранващото напрежение води до появата на висши хармоници в спектъра на тока и съответната резултантна вълнова форма. На фиг. 5 се вижда изоставането на тока, спрямо захранващото напрежение, което говори за индуктивният му характер. А тока на синхронния реактивен двигател показан на фиг. 5, който е почти във фаза със захранващото напрежение.



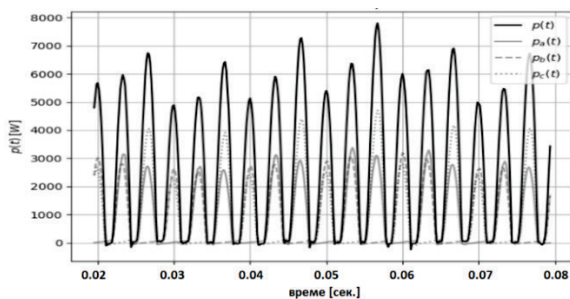
Фиг. 4. Фазни напрежения и токове на синхронен реактивен двигател с регулатор на скоростта.



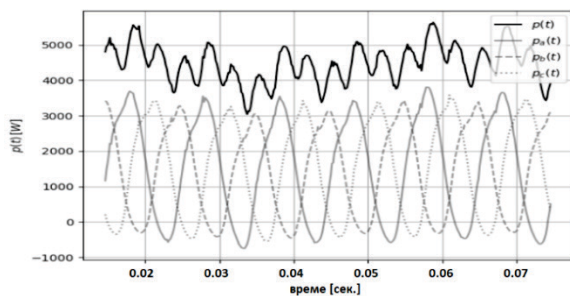
Фиг. 5. Фазни напрежения и токове на асинхронен двигател.

На фиг. 6 и фиг. 7 са показани моментните фазни и моментните общи мощности за системата синхронен реактивен двигател с регулатор на скоростта и за асинхронния двигател. При идеална трифазна синусоидална система напрежения и токове общата моментна мощност трябва да е константа. От фиг. 7 се вижда, че има пулсации в общата моментна мощност, дължащи се на пулсиращия въртящ момент, който е типичен за буталните компресори.

Видът на общата моментна мощност за системата СРД-РС е характерен при наличие на неуправляеми изправители в силовата схема на РС.



Фиг. 6. Моментни мощности на синхронен реактивен двигател с регулатор на скоростта.



Фиг. 7. Моментни мощности на асинхронен двигател.

Разглеждайки кривите на фазните моментни мощности, показани на фиг. 7, се вижда обмяна на реактивна мощност с индуктивен характер, тъй като кривите имат и отрицателни стойности. От друга страна системата СРД-РС на практика не черпи реактивна мощност, както се вижда от фиг. 6.

АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Въз основа на моментните стойности на напреженията и токовете, които са експериментално заснети, чрез измервателната система показана на фиг. 3 се пресмятат количествени и качествени показатели на електрическата енергия. Сегашното ниво на познание за мощностите в електроснабдителните системи е дало в резултат десетки мощностни теории. Тези показатели са пресметнати използвайки подхода с моментната мощност към стандарта IEEE 1459-2010. Използваните изрази за анализ на резултатите са в съответствие с определенията, дадени в [1, 2].

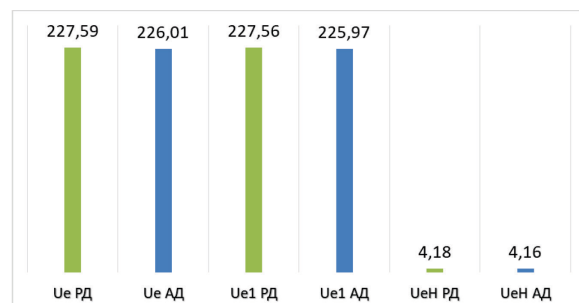
В израз (1) са дадени определенията за ефективното напрежение - U_e ; ефективно напрежение по първи хармоник - U_{e1} и неосновното ефективно напрежение (породено от хармоници) - U_{eH} .

$$U_e = \frac{\sqrt{U_a^2 + U_b^2 + U_c^2}}{3}$$

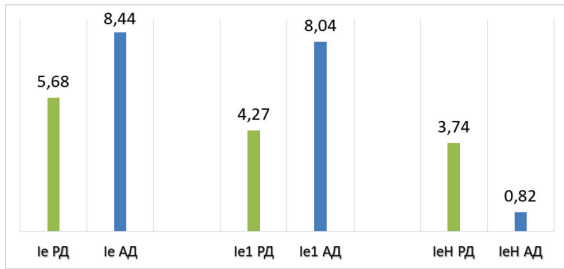
$$U_{e1} = \frac{\sqrt{U_{a1}^2 + U_{b1}^2 + U_{c1}^2}}{3} = \sqrt{(U_1^+)^2 + (U_1^-)^2 + (U_1^0)^2}$$

$$U_{eH} = \frac{\sqrt{U_{aH}^2 + U_{bH}^2 + U_{cH}^2}}{3} \quad (1)$$

Същите величини за тока се изчисляват, чрез изрази (1), като се замести напрежението с тока.



Фиг. 8. Напрежения според израз (1) за синхронен реактивен двигател – (РД) и асинхронен двигател – (АД).

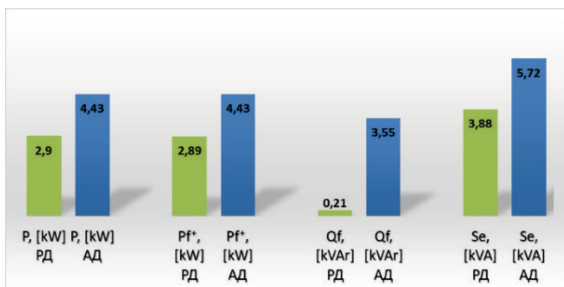


Фиг. 9. Токове според израз (1) за синхрeнен реактивен двигател – (РД) и асинхронен двигател – (АД).

От фиг. 8, на която са показани напреженията според израз (1) се вижда, че изследването за двата типа двигатели е проведено при едни и същи условия по отношение на захранващото напрежение, тъй като стойностите на практика са еднакви и в двата случая. На фиг. 9 са показани токовете изчислени според изрази (1). Хармоничния състав на тока за системата СРД-РС е в пъти по-висок от този на асинхронния двигател.

В израз (2) са представени пълната активна мощност – P [kW]; активна мощност по първи хармоник – P_f^+ [kW]; реактивна мощност по първи хармоник – Q_f^+ [kVAr]; пълната ефективна мощност – S_e [kVA].

$$\begin{aligned}
 P &= \sum_{k=1}^m \sum_h U_{kh} I_{kh} \cos \varphi_{kh} \\
 P_f^+ &= \sum_{k=1}^m U_k I_k \cos \varphi_k \\
 Q_f^+ &= \sum_{k=1}^m U_k I_k \sin \varphi_k \\
 S_e &= 3U_e I_e = \\
 &= \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + U_c^2} \cdot \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$



Фиг. 10. Мощности според израз (2) за синхрeнен реактивен двигател – (РД) и асинхронен двигател – (АД).

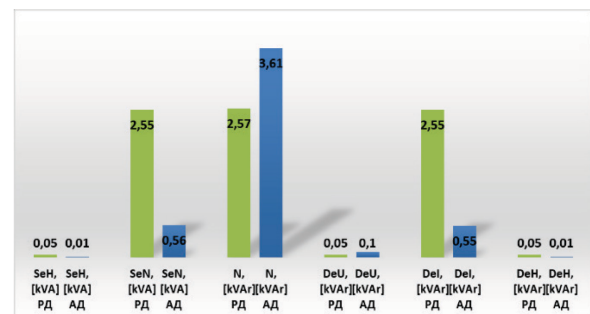
Фиг. 10, на която са показани различните мощности за двата вида двигателя, потвърждава направените до тук изводи по отношение на реактивна мощност. Ясно се вижда, че системата СРД-РС на практика не черпи реактивна мощност.

Чрез изрази (3) и (4) са изчислени пълни, деформационни и неактивна мощности съответно; хармоничната пълна мощност – S_{eH} [kVA]; неосновната пълна ефективна мощност – S_{eN} [kVA]; неактивната мощност – N [kVAr]; деформационна мощност дължаща се на изкривявания в напрежението – D_{eU} [kVAr]; деформационна мощност дължаща се на изкривявания в тока – D_{eI} [kVAr] и деформационна мощност от висши хармоници – D_{eH} [kVAr].

От фиг. 11 се вижда, че неосновната пълна ефективна мощност за системата СРД-РС е много по-голяма от тази на АД. Както се вижда от израза (3) S_{eN} се дължи на неосновните (хармоничните) съставки в напреженията и токовете.

$$\begin{aligned}
 S_{eH} &= 3U_{eH} I_{eH} = \sqrt{P_H^2 + D_{eH}^2} \\
 S_{eN} &= \sqrt{D_{eI}^2 + D_{eU}^2 + S_{eH}^2} \\
 N &= \sqrt{S_e^2 - P^2}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 D_{eU} &= 3U_{eH} I_{e1} \\
 D_{eI} &= 3U_{e1} I_{eH} \\
 D_{eH} &= \sqrt{S_{eH}^2 - P_H^2}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$



Фиг. 11. Пълни, деформационни и неактивна мощности, според изрази (3) и (4) за синхрeнен реактивен двигател – (РД) и асинхронен двигател – (АД).

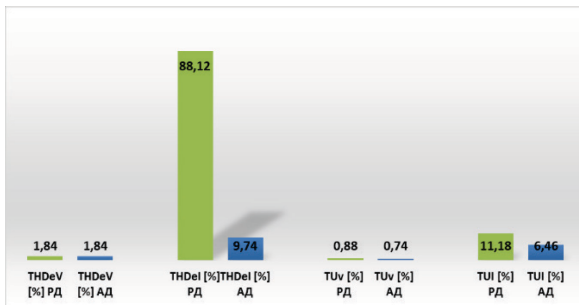
Голямата ѝ стойност спрямо тази на АД също потвърждава казаното по-горе и се дължи на силно изкривената форма на тока, породена от трифазния изправител.

Наблюдавайки стойностите на неактивната мощност за двата типа двигатели, отчитаме значително по-голяма стойност за АД. Както се вижда от израза (4) тази мощност се състои от основни и неосновни неактивни компоненти. По-голямата ѝ стойност за АД се дължи на значителната реактивна мощност от първи хармоник. За системата СРД-РС неактивната мощност се дължи на висшите хармоници, генерирани от РС.

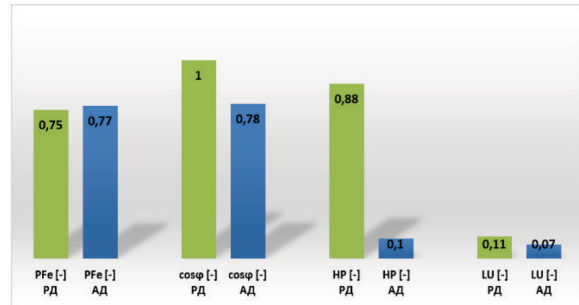
Деформационната мощност дължаща се на изкривяванията в напрежението D_{eU} , е на практика близка до нула и при двата проведени експеримента. Тези стойности показват, че напрежението е с много нисък хармоничен състав или с други думи захранващото напрежение е почти синусоидално.

Показателите за качеството на електрическата енергия и начинът за пресмятането им са показани, чрез използването на формулите от израз (5).

$$\begin{aligned}
 THD_{eV} &= \frac{U_{eH}}{U_f^+}; & THD_{eI} &= \frac{I_{eH}}{I_f^+} \\
 TU_V &= \frac{U_{U1}}{U_f^+}; & TU_I &= \frac{I_{U1}}{I_f^+} \\
 PF_e &= \frac{P_f^+}{S_e}; & \cos \varphi &= \frac{P_f^+}{S_f^+} \\
 HP &= \frac{S_{eN}}{S_f^+}; & LU &= \frac{S_{U1}}{S_f^+}
 \end{aligned} \quad (5)$$



Фиг. 12. Показатели за качеството на електрическата енергия от израз (5) за синхронен реактивен двигател – (РД) и асинхронен двигател – (АД).



Фиг. 13. Показатели за качеството на електрическата енергия от израз (5) за синхронен реактивен двигател – (РД) и асинхронен двигател – (АД). Продължение

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Високата стойност на THD_{eI} на системата СРД-РС, показана на фиг. 12 и определена от израз (5) показва високото хармонично съдържание в тока, спрямо този на АД. THD_{eU} , както вече бе казано, е с ниски стойности.

Ефективният фактор на мощността PF_e е на практика еднакъв и за двата типа двигатели.

Изчислената стойност на $\cos \varphi$, показана на фиг. 13 е по-ниска за АД, отколкото за СРД-РС, както и се очаква, според изложеното до тук. В системата СРД-РС, $\cos \varphi$ е единица, т.к. първия блок от силовата схема на РС е трифазен изправител по схема Ларионов, за който е характерно това, че пърси хармоник на тока е във фаза с напрежението.

Показателят за хармонично замърсяване HP (harmonic pollution) е в пъти по-висок за системата СРД-РС спрямо АД.

Сравнена е работата на системата СРД-РС и стандартния асинхронен двигател по отношение на енергийната ефективност. Анализът на резултатите показва, че синхронния реактивен двигател управляван от регулатор на скорост има много повече предимства спрямо неуправляван асинхронен двигател. Предимства като: нисък стартов ток, плавен старт, регулиране на скоростта. В допълнение, регулатора на скоростта осигурява много други функции като управление чрез смартфон и многобройни настройки за работа на двигателя. Въпреки тези предимства обаче, системата значително на-

малява качествените показатели на мощността и електромагнитната съвместимост. Ако не се изисква контрол на скоростта, асинхронният двигател остава вероятно по-добър избор. Същият резултат може да се очаква и от комплекта РС-АД. Трябва да се прецени дали повишената ефективност на СРМ (в случая с около 8%) спрямо АД е решаващо предимство.

БЛАГОДАРНОСТИ

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са извършени по проект НП17/2023 в рамките на присъщата на ТУ - Варна научноизследователска дейност, финансирани целево от държавния бюджет.

REFERENCE

- [1] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. (2010, Mar.). 3 Park Avenue, New York, USA : IEEE Power & Energy Society.
- [2] Munoz-Galeano, N., Alfonso-Gil, J., Grau-Orts, S., Segui-Chillet, S., Gimeno-Sales, F.J. (2015). "Instantaneous approach to IEEE Std. 1459 power terms and quality indices.", Electrical Power and Energy Systems, Elsevier.
- [3] Low voltage IE5 Synchronous reluctance motors. ABB, catalog september 2023, www.abb.com/motors&generators.