

ВИСОКОЕФЕКТИВНО УПРАВЛЕНИЕ НА СИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ ЗА ПРОМИШЛЕНИ ВЕНТИЛАЦИОННИ СИСТЕМИ

Емил Рачев, Владислав Петров

Резюме: В статията е представено приложение на безсензорно векторно управление на синхронен двигател с постоянни магнити за високоефективно задвижване на промишлени вентилатори. В общият случай приложението изисква висока ефективност, поради непрекъснатата работа на вентилационните системи. Замяната на класически използваните асинхронни двигатели със синхронни с постоянни магнити и електронен преобразувател, цели намаляване на разходите за електроенергия в промишлените предприятия в дългосрочен план.

Ключови думи: енергийна ефективност, безсензорно векторно управление, синхронни двигатели с постоянни магнити

HIGH EFFICIENCY PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DRIVE FOR USE IN INDUSTRIAL VENTILATION

Emil Rachev, Vladislav Petrov

Abstract: This paper presents an implementation of a high efficiency permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive using sensorless vector control algorithm. The drive application requires high efficiency due to the continuous mode of operation of the ventilation system. Replacing the generally used induction motors with PMSM and integrated electronics reduces power consumption of the whole system.

Keywords: energy efficiency, sensorless vector control, permanent magnet synchronous motor

1. Въведение

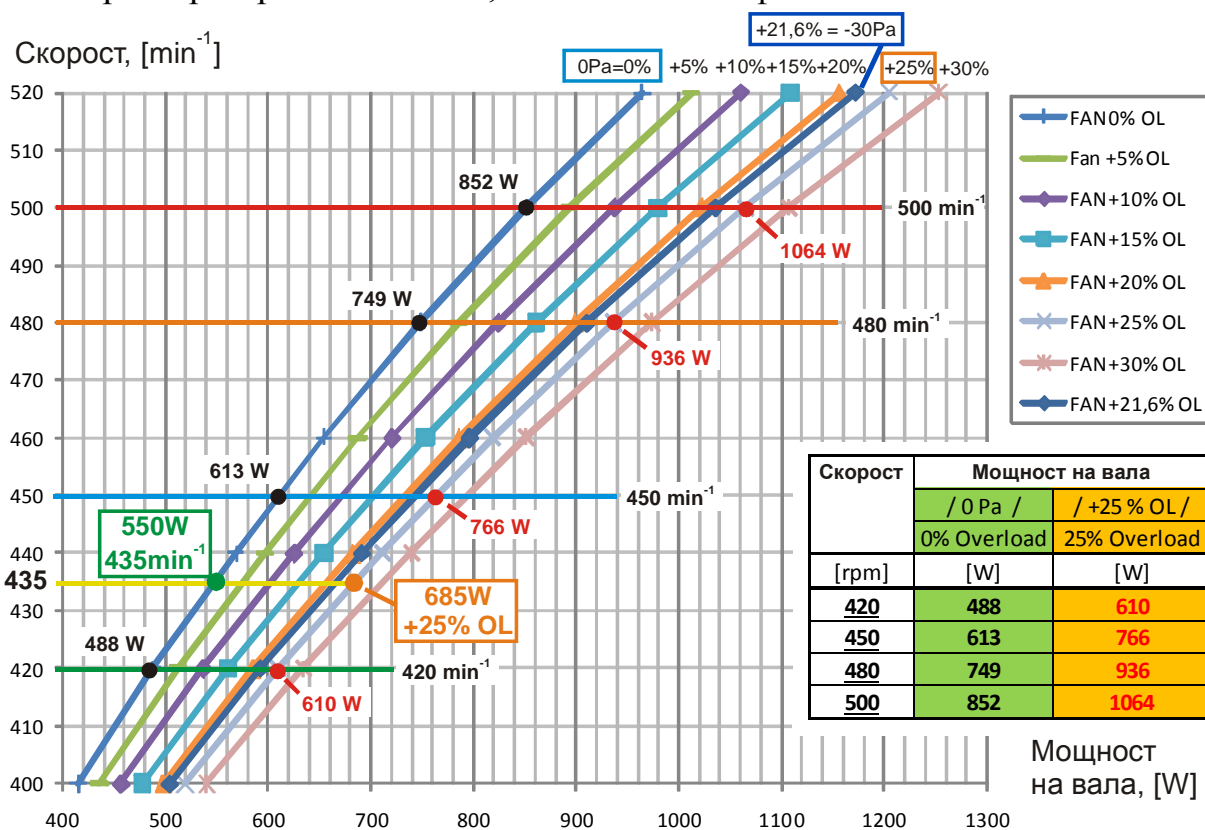
Енергийната ефективност при системата *двигател - вентилаторна перка* във вентилационните системи се определя от електрическата енергия - [W/h] за придвижване на определено количество флуид - [m³] или мощността - [W], необходима за поддържане на определен дебит - [m³/h]. При постоянен дебит, за ефективността на вентилатора се използва мерната единица W/m³/h или W/1000m³/h.

Ефективността в този тип системи зависи от два основни компонента - **ефективност на електрозадвижването** на вентилатора (двигател или двигател и електроника) и **ефективност на перката** на вентилатора. В настоящата статия предмет на разглеждане е задвижването на вентилатор за промишлена вентилационна система с мощност под 1kW и скорост, в диапазона 400-500 min⁻¹. Въпросите, свързани с аеродинамика и повишаване на ефективността на перката, при даден диаметър и брой лопатки, не са предмет на настоящата работа. **Целта на работата е повишаване на енергийната ефективност на електрозадвижването на вентилатора**, тъй като дори малка разлика в коефициента на полезно действие би довела до намаляване на разходите за електроенергия в дългосрочен план при приложения, изискващи непрекъсната работа на вентилационната система с инсталиран голям брой вентилатори.

При работа със статична скорост, масово за тези целите се използват асинхронни двигатели – в конкретното приложение, засегнато в статията, асинхронен двигател с мощност 0.5W до 1kW. Изискването за работна скорост в диапазона 400min⁻¹ до 500min⁻¹, изисква използването на двигател с 12 полюсна статорна намотка. Според международният стандарт за въртящи се електрически машини IEC 60034, по таблицата за *IE3 Premium Efficiency*, за 6 полюсен асинхронен двигател с мощност 0.75kW при 50Hz захранване е даден коефициент на полезно действие КПД=78.9% - [1]. Въпреки, че стандартите за ефективност според IEC 60034, в частност IE3, не са приети в цял свят вече се споменава за обсъждане на *IE4 – Super Premium Efficiency* и *IE5 – Ultra Premium Efficiency* – [1]. Непрекъснатото повиваване на изискванията, по отношение на енергийната ефективност, нормално водят и до повишаване на изискванията на клиентите към производителите на електродвигатели. Въпреки, че според IE3 няма дефинирани стандартни стойности на КПД за двигатели с 12 полюса, се поставя въпросът за повишаване на ефективността на задвижването на вентилатор, за който е използван асинхронен двигател с мощност под 1kW, 12 полюса и КПД около и по-малко от 74%, с около 10%. Освен сериозните затруднения, свързани с повишаването на ефективността на съществуващо технологично решение за асинхронен двигател с кафезен ротор с 10%, се появява още един аспект на проблема. За фино оптимизиране на ефективността на вентилатора, от гледна точка на аеродинамиката, от значение е и възможността за точно регулиране на скоростта и поддържането ѝ в определена точка. Това от своя страна води към използване на инвертор с обратна връзка по скорост, което прави изпълнението на задачата с асинхронен двигател, на практика неизпълнима. Логичната стъпка е замяна на асинхронния двигател без управление със синхронен двигател с постоянни магнити с електронен преобразувател [2], по възможност вграден в самия двигател. Това разбира се води до увеличаване на инвестиционните разходи, но предвид тенденциите за поевтиняване на магнитите, с появата на голям брой производители, предимно в Китай, както и наличието на достъпна и все по-евтина база от електронни компоненти, инвестицията се оказва разумна в дългосрочен план.

2. Характеристики на товара

Въпреки, че на пръв поглед работата на задвижването в конкретното приложение изглежда като работа със статичен товар при фиксирана скорост, всъщност задвижването е подложено непрекъснато на динамично натоварване. Особено при големи помещения се създават течения, които могат да подложат вентилатора на значително подналягане, което по задание може да доведе до около 25% - 30% претоварване. При задание за номинална мощност 550W на вала на двигателя и работа на вентилатора при 0Pa без подналягане, претоварването може да доведе до около 700W мощност на вала, което може да бъде и за продължителен режим на работа. Характеристиките на товара, както и някои характерни работни точки, са показани на фиг.1.



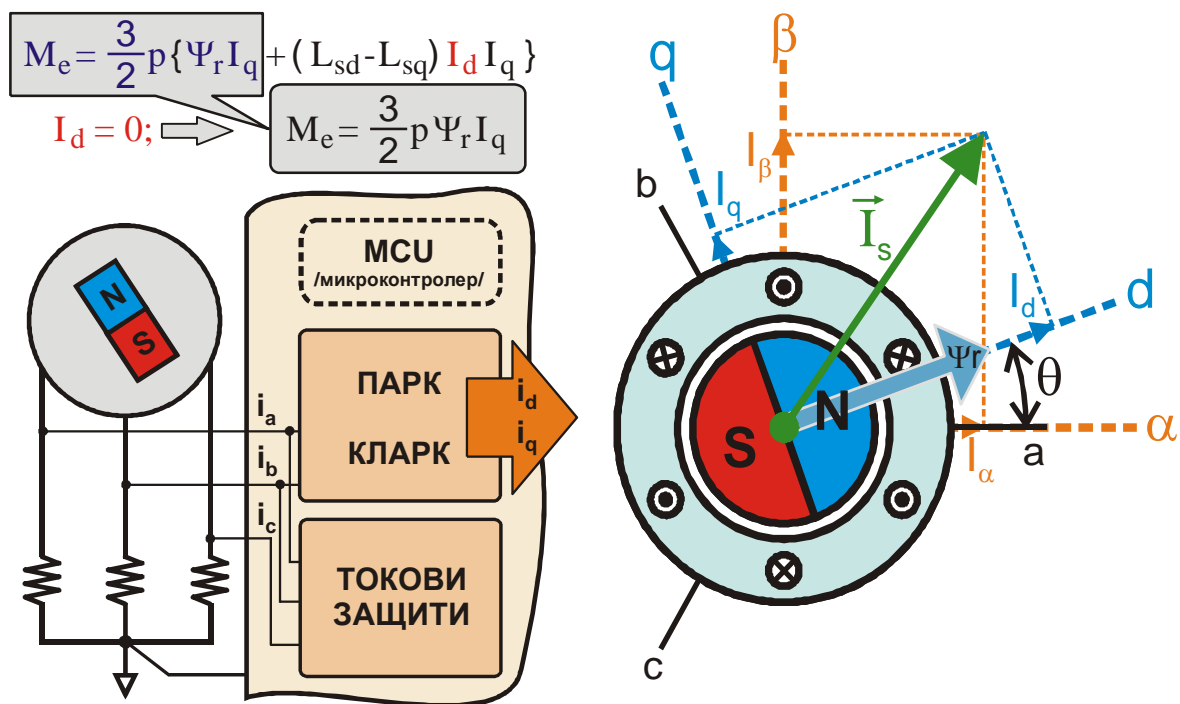
Фиг. 1 – Характеристики на вентилаторната перка без подналягане (0Pa) и с прилагане на подналягане, с претоварване до 30%

Оптималната работна точка на вентилатора е при скорост 435min^{-1} , където номиналната мощност на двигателя е 550W. В някои приложения, за кратко време, както и при смяна на сезоните или необходимост от промяна на климатичните условия в помещението, може да се наложи промяна на скоростта, като възможните работни точки са 420min^{-1} , 435min^{-1} , 450min^{-1} и 480min^{-1} .

Изискванията към електронния преобразувател са да има минимални загуби в него, да гарантира сигурно развъртане на двигателя, дори при наличие на подналягане, да позволява регулиране на скоростта и не на последно място да гарантира оптимална работна точка за двигателя при всеки работен товар.

3. Векторно управление на синхронен двигател с постоянни магнити

Основно предимство на синхронния двигател с постоянни магнити пред асинхронния с кафезен ротор е повишаване на коефициента на полезно действие при един и същ габарит. На практика обаче, двигателят е неизползваем без наличие на електронен преобразувател, който да осигури стартиране и нормална работа на двигателя. Най-простият вариант за управление е *честотно (скалярно) управление при $U/f=const$* [3]. Честотното управление е възможен вариант в конкретното приложение, тъй като стартирането на двигателя не е под голям товар, дори и при наличие на течение и подналягане. Честотно управление с $U/f=const$ обаче е приложимо и подходящо, ако двигателят работи без наличие на подналягане. При липса на подналягане може да се въведе конкретно отношение $U/f=const$ според кривата при 0Pa - фиг.1. При изместване на кривата надясно обаче, двигателят не работи в оптимално магнитно отношение. Причината е, че при промяна на товара и неправилно отношение U/f в конкретната точка се появява съставка на тока и по оста "d" на координатната система, фиксирана спрямо ротора – фиг. 1.



Фиг. 2 – Векторно управление на синхронен двигател с постоянни магнити;

M_e - електромагнитен момент; p – брой чифтове полюси; Ψ_r – роторно потокосцепление; I_d, I_q – съставки на статорния ток в „d-q“ координатна система; L_{sd}, L_{sq} - индуктивности

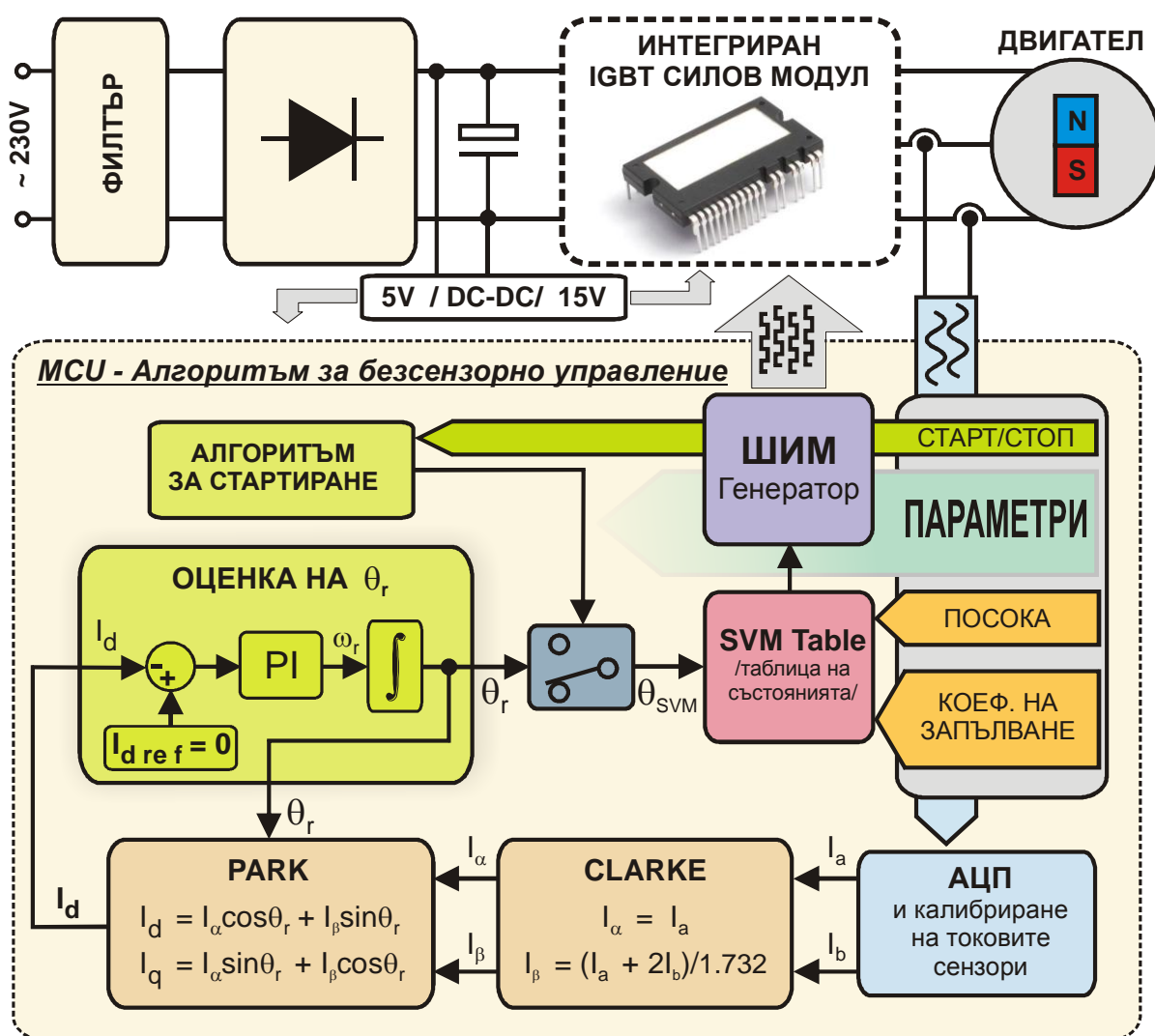
Това води до създаване на потокосцепление по оста на магнита, което е излишно и води до влошаване на коефициента на полезно действие. Възможно е вземане на мерки за преодоляване на недостатъците, но при „чисто“ честотно управление е възможно излизане на двигателя от синхронизъм, при по-голямо

претоварване. Недостатъците на метода за честотно управление се елиминират с прилагане на **векторно управление** [3,4] - фиг. 2.

При векторно управление се реализира математическо трансформиране на трифазната статорна намотка във фиктивна двуфазна. На база на обратни връзки по ток и скорост на ротора се определя модула и ъгловото положение на пространствения вектор на роторното потокосцепление Ψ_r , като спрямо него се ориентира декартовата координатна система „d-q“. Управлението се реализира така, че съставката на статорния ток по оста „d“ на координатната система „d-q“ да е равна на нула – $I_d=0$.

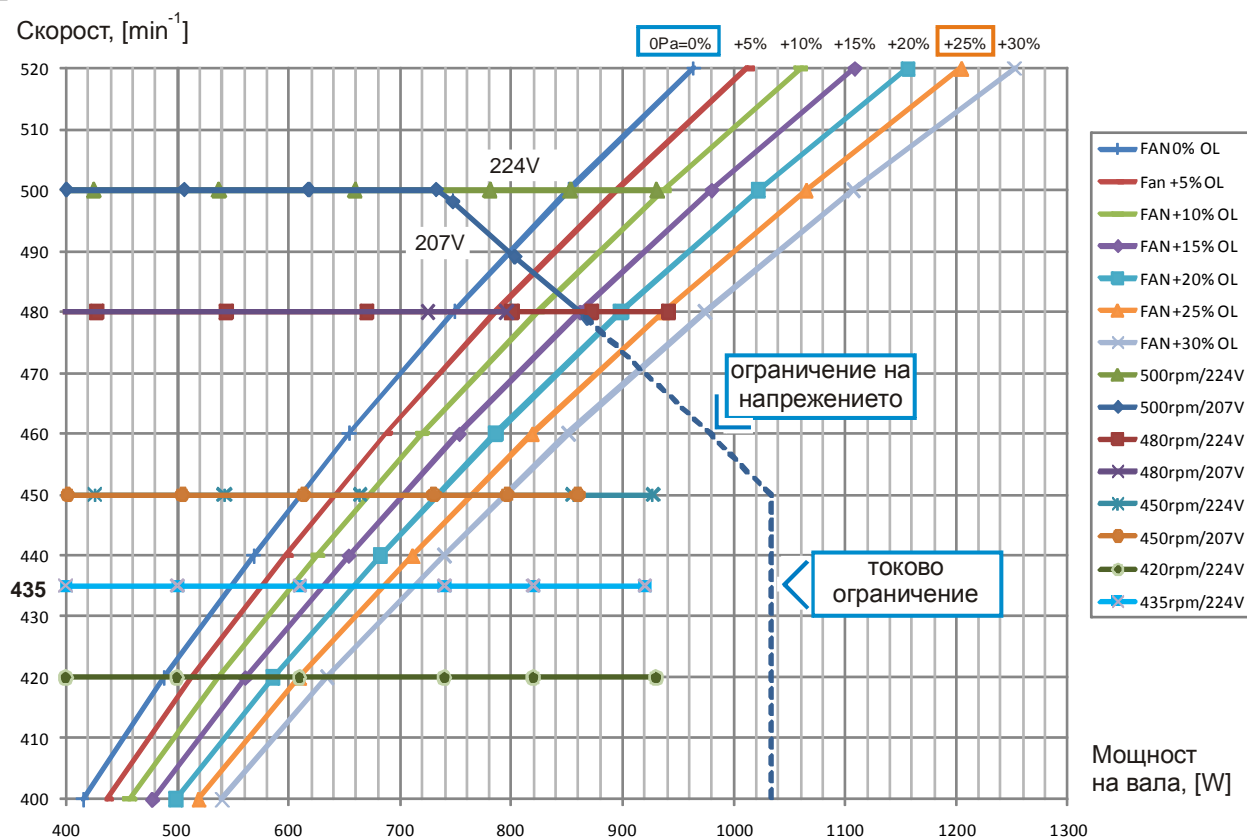
4. Електронен преобразувател с безсензорно векторно управление на синхронен двигател с постоянни магнити

Алгоритъма на управление и блок схема на електронния преобразувател са показани на фиг. 4. За реализация на принципа на векторно управление е необходим сензор за определяне на скоростта на двигателя или алгоритъм за оценка на скоростта, на база на измерени електрически величини.



Фиг. 3 – Блок схема на безсензорно векторно управление със синхронен двигател с постоянни магнити

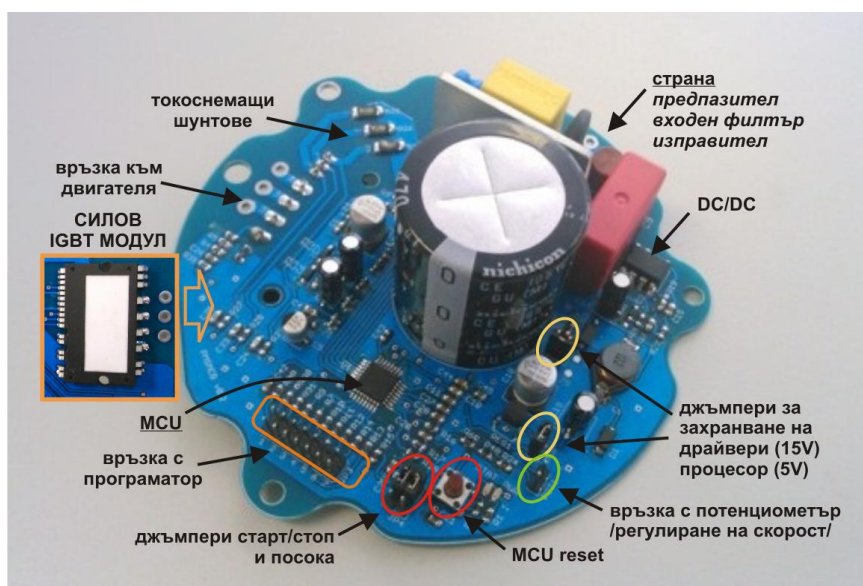
Терминът *безсензорно управление* [4,5] означава, че на вала на двигателя няма монтиран сензор за измерване на скоростта или положението на ротора. Безсензорно управление не означава, че няма сензори, за реализация на управление с обратна връзка. Самият двигател обаче няма монтиран допълнителен сензор на вала, а за скоростта се съди по косвен път, като се използват обратни връзки по ток – измерва се тока към двигателя – фиг.3. Най-простия и евтин вариант за измерване на тока е използване на токоснемачи шунтове (фиг.2). Сигналът от тях се подава на микроконтролера и след веригите за посрещане и калиброване на сигнала, той се трансформира първо от трифазна система от токове в двуфазна (трансформация на Кларк), а след това и в двуфазна въртяща се координатна система (трансформация на Парк). Определянето на ъгъла на завъртане на ротора и скоростта става на база на потокообразуващата съставка на тока I_d , която се поддържа равна на нула – фиг.3. Основен недостатък на метода за безсензорно управление е свързана с гарантиране на добра работа при ниски скорости. При вентилаторно приложение, обаче работата при ниски скорости не е необходима, а и натоварването на двигателя при стартиране е незначително. Стартирането на двигателя става както при честотно управление, с поддържане $U/f=const$. След стартиране на двигателя с честотно управление до около $30 - 50 \text{ min}^{-1}$, когато двигателят вече се върти и протичат определени токове, се преминава към векторно управление. Характеристики на задвижването и товара са показани на фиг. 4.



Фиг. 4 – Характеристики на вентилаторната перка без подналягане (0Pa) и при претоварване, с прилагане на подналягане, заедно с характеристики на синхронния двигател и електронния преобразувател с векторно управление

Важно предимство на метода за векторно управление в конкретния случай, е че ако в следствие на претоварване не достига напрежение за поддържане на моментобразуващата съставка на тока I_q (фиг.2), скоростта намалява, след определено претоварване на двигателя, подобно на работа с асинхронен двигател – фиг. 4, без двигателя да излиза от синхронизъм. Това е предимство, което се забелязва главно при намаляване на входното напрежение към преобразувателя. Съвместната работа на двигателя и преобразувателя е съгласувана спрямо товара от една страна и мрежата от друга страна. Мрежовото напрежение е еднофазно 230V/50Hz $\pm 10\%$, което означава, че управлението трябва да работи нормално, дори при 207V захранване. При токоизправител без корекция на фактора на мощност, максималното възможно напрежение към двигателя зависи от флукуациите на захранващото напрежение. Проблемът е, че при по-ниско входно напрежение и претоварване на двигателя е възможно да не достига напрежение за поддържане на зададените обороти. Тогава обаче, двигателя не излиза от синхронизъм. Характеристики на задвижването заедно с характеристиките на товара са дадени на фиг.4. В целия си диапазон характеристиката на задвижването е дадена при задание 500 min^{-1} и напрежение 207V. С плътна линия са дадени измерени стойности, а с пунктир стилизирано е показан характера на кривата, до момента на претоварване, в който настъпва токово ограничение. При задание 480 min^{-1} двигателят би работил нормално, дори при 207V входно напрежение и претоварване около 15%. При претоварване 25%-30% оборотите леко намаляват, до около $475\text{-}470 \text{ min}^{-1}$, но двигателят няма да излезне от синхронизъм.

Снимка на преобразувателя, подготвен за вграждане в двигател е показана на фиг. 5. Блок схема на силовата част е показана на фиг. 3.



Фиг. 5 – Преобразувател за вграждане

Таблични данни за комплексният коефициент на полезно действие на задвижването (двигател и електроника) са дадени на фиг. 6.

ИЗМЕРЕНО			ИЗЧИСЛЕНО		
U ф	P ел.	СКОРОСТ	Момент	P мех.	КПД
[V]	[W]	[min-1]	[Nm]	[W]	[%]
<i>задание за скорост - 420 min⁻¹</i>					
230	385	420	7.4	324.0	84.2
230	520	420	9.9	434.6	83.6
230	660	420	12.5	549.2	83.2
230	820	420	15.3	670.8	81.8
230	1080	420	19.5	857.5	79.4
<i>задание за скорост - 450 min⁻¹</i>					
230	375	450	6.7	315.2	84.0
230	520	450	9.3	438.1	84.2
230	660	450	11.8	554.6	84.0
230	820	450	14.4	676.7	82.5
230	1095	450	18.7	881.7	80.5

ИЗМЕРЕНО			ИЗЧИСЛЕНО		
U ф	P ел.	СКОРОСТ	Момент	P мех.	КПД
[V]	[W]	[min-1]	[Nm]	[W]	[%]
<i>задание за скорост - 480 min⁻¹</i>					
230	370	480	6.3	315.7	85.3
230	520	480	8.8	443.6	85.3
230	660	480	11.1	558.0	84.5
230	800	480	13.3	670.4	83.8
230	870	480	14.3	717.7	82.5
230	900	480	14.8	745.3	82.8
230	1100	472	17.8	882.2	80.2
230	1200	467	19.5	953.4	79.5

Фиг. 6 – Данни за коефициента на полезно действие (КПД) за електрозадвижването (двигател и преобразувател)

5. Заключение

От данните на фиг.6 се вижда, че в номинален режим на работа, без подналягане, за скорости 420min^{-1} и 450min^{-1} коефициента на полезно действие на задвижването (двигател и електроника) е около 83%. За работа при 480min^{-1} е около 82%. Конкретни измервания по отношение на разпределене на загубите в двигателя и преобразувателя не са правени, тъй като крайната цел е постигане на високо комплексно КПД. Електронния преобразувател е опростен, без излишни функции с цел минимални загуби.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Almeida A., Ferreira F., *Super-Premium Efficiency Class Electric Motors*, ISR - Dep. Electrical Engineering – University Of Coimbra, 2010
- [2] Benhaddadi M., Landry F., Houde R., Olivier G., *Energy efficiency electric Premium motor-driven systems*, Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium
- [3] Рац Е., *Векторно управление на електрически машини*, Авангард Прима, София 2010
- [4] Vas P., *Sensorless vector and direct torque control*, Oxford University Press, Oxford, 1998
- [5] Chou T.Y., Liu T.H., Cheng T.T., *Sensorless micro-permanent magnet synchronous motor control system with a wide adjustable speed range*, Electric Power Applications, IET, Volume: 6, Issue: 6, 2012

Автори: Емил Рачев, гл. ас. д-р, катедра „Електрически Машини” при ТУ - София, e-mail: ehra@tu-sofia.bg; Владислав Петров, бак. инж., студент в ТУ-София.