

РАЗРАБОТВАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН СТЕНД ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ И НАСТРОЙКА НА РАБОТНИТЕ РЕЖИМИ НА ЧЕСТОТЕН ИНВЕРТОР VACON® 20 ПРИ РАЗЛИЧНИ ПРИЛОЖЕНИЯ

Денис Петков Петков*, Продан Иванов Проданов

Технически университет – Габрово, Габрово, България

*кореспондиращ автор: eng.denis.petkov@gmail.com

DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL TEST BENCH FOR INVESTIGATION AND ADJUSTMENT OF THE OPERATING MODES OF THE VACON® 20 FREQUENCY CONVERTER IN VARIOUS APPLICATIONS

Denis Petkov Petkov*, Prodan Ivanov Prodanov

Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria

*Corresponding author: eng.denis.petkov@gmail.com

Abstract

This paper presents a laboratory investigation of the VACON® 20 variable frequency drive (VFD) on a dedicated test stand. The stand employs a cone-rotor asynchronous motor (asynchronous cone motor) with a disc brake to provide adjustable mechanical load, a VACON 20 (1.1 kW) inverter, an external I/O control panel with selector switches and status lamps, and a USB adapter for VACON Live software. The methodology covers motor nameplate parameterization, communication setup, and three operating modes: All analog reference (0–10 V potentiometer), preset fixed speeds via digital inputs, and motorized potentiometer (UP/DOWN). Results show reproducible frequency/current responses under no-load and loaded conditions with safe ramp dynamics. The study offers a structured workflow for education and commissioning of VFD-driven cone-rotor asynchronous motor systems.

Keywords: VACON 20; variable frequency drive; cone-rotor asynchronous motor; preset speeds; motorized potentiometer; laboratory stand.

ВЪВЕДЕНИЕ

Асинхронните двигатели са доминиращ избор в индустрията поради простата конструкция, висока надеждност и ефективност [1, 2 и 3]. В тази публикация се представя методика за лабораторно изследване и настройка на VACON®20 върху стенд, който използва асинхронен конусен двигател с дискова спирачка за реализиране на регулируемо механично натоварване. Стендът включ-

ва инвертор 1.1 kW VACON 20, външен I/O пулт с ключове и индикаторни лампи (READY/RUN/FAULT), USB комуникационен адаптер и софтуер VACON Live за параметризация, мониторинг и диагностика [2]. Целта на доклада е да се синтезират и изследват последователността от настройки и изпитвания в три режима (аналогов референт AII, режим с фиксирани изходни скорости и режим с моторен потенциометър), както и да

се анализира промяната на тока при различни натоварвания. За постигане на тази цел е необходимо да се разработи и представи експериментален стенд за изследване на честотен инвертор VACON®20 и да се анализират неговите работни режими при управление на асинхронен двигател с регулируемо механично натоварване. Изследването има за цел да оцени динамичните и статичните характеристики на инвертора при различни стратегии за управление (*аналогов вход, фиксирани скорости и моторен потенциометър*), да се изследва влиянието на параметричните настройки върху тока, честотата и стабилността на системата, както и да се провери ефективността на защитните и комуникационните функции.

Получените резултати подпомагат доброто разбиране на поведението на инвертора в реални приложения и служат като основа за обучение, диагностика и оптимизация на клас подемни електродвижвания, базирани на системата „честотен инвертор – асинхронен двигател“.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Синхронната скорост на трифазен асинхронен двигател е $n_s = 120 \cdot f/p$, като реалната скорост на въртене е по-ниска поради приплъзване или т. нар. „хлъзгане на ротора“, като от там идва и наименованието асинхронни двигатели. За поддържане на постоянен въртящ момент в широк диапазон на изменение на скоростта се прилага законът $U/f = \text{const}$. Подобни техники за честотно и напреженово управление чрез инверторно свързани източници са подробно разгледани и в научната литература, където се описват съвременни подходи за стабилизиране на напрежението и честотата при различни натоварвания [Asadi et al., 2022] [4] (*или т. нар. скалярно V/Hz управление*), като това е метод реализиран чрез трифазен PWM инвертор в изхода за управление на намотките на двигателя. Отвореният контур по скорост

(*sensorless/vector - подобна компенсация*) подобрява поддържането на обороти при изменение на товара. Силовата структура на даден честотен инвертор включва в себе си: диоден изправител (*еднофазен или трифазен в зависимост от мощността на инвертора*), DC шина с филтриращи кондензатори, регулатор на напрежение, трифазен IGBT инвертор с PWM модулация, драйверни блокове осигуряващи гейтови импулси и различни по вид защиты. Настоящата работа е фокусирана върху приложението на честотен инвертор за управление на конусен (*cone-rotor*) асинхронен двигател, като други типове асинхронни двигатели се обсъждат само сравнително, където е уместно. Различни методи за управление на инверторите и тяхната ефективност при различни приложения са разгледани и в други изследвания, посветени на управлението на инвертори в енергийни системи и ВЕИ [Mishra et al., 2020] [6].

I. Експериментална установка и комуникация

Стендът използва честотен инвертор тип VACON20 и асинхронен конусен двигател с дискова спирачка за контролируемо натоварване – фиг. 1.



Фиг. 1. Общ изглед на стенда с асинхронен конусен двигател

Инверторът VACON 20 е свързан към двигателя и към външен пулт, като управлението се осъществява посредством следните ключове:

- ON–OFF–ON ключ (свързан към изводи DI1 FWD / DI2 REV на честотния инвертор, като използват обща +24V шина);

- отделни ON–OFF ключове (свързани към изводи DI4–DI6) и индикаторни лампи, управлявани от изводи RO1/RO2.

Чрез USB адаптер и софтуер „VACON Live“ се осъществява онлайн настройка, наблюдение и запис/четене на параметри (т. нар. Load all/selected from/to Drive).

При нужда се сверяват COM порта и скоростта в Device Manager и Drive → Communication → Settings. Чрез панела (Back/Reset, OK, ↑/↓, ←/→) се въвеждат данните на двигателя от идентификационната му табелка (параметри P1.1...P1.5 и токово ограничение $P1.7 \approx 1.5 \times I_N$).

II. Приложения на честотния инвертор

Приложение А — Управление чрез външен потенциометър (вход AI1, 0–10 V).

Това приложение използва се предимно там, където е необходимо прецизно и често регулиране на оборотите на електродвигателя от оператор – най-често при дървообработващи и шлифовъчни машини, транспортни ленти и трошачни инсталации в каменодобивната промишленост.

Опитната постановка се състои от контролен пулт със следните управляващи ключове:

- двупозиционен превключвател ON–OFF–ON за пуск в посока „Напред/Назад“ свързан към входове DI1/DI2 (с обща +24V шина);

- отделни ON–OFF ключове за допълнителни входове.

Основните параметрични настройки са следните: P17.2 = 0 (видими параметри); P2.1 = 0 (I/O terminal), P2.2 = 0 (Ramp), P2.3 = 0 (Coasting); P3.1 = 5Hz, P3.2 = 50Hz; P4.2 = 3s, P4.3 = 3 s; P3.3 = 4 (AI1, 0–10 V, 10 mAmax); P5.1 = 1 (DI1 – Start/Forward), P5.2 = 2 (DI2 – Start/Reverse); P7.1 = 2 (RO1=Run), P7.2 = 3 (RO2=Fault).

Процедура на провеждане: настройва се обхватът на потенциометъра от 5 до 50 Hz, като се следят референтните стойности на зададена и изходна честота V1.1/V1.2 (референтна/изходна честота) и V1.4 (ток) без товар и при няколко ни-

ва на натоварване.

Приложение Б — Управление с фиксирани скорости (Preset/Fixed Speeds).

Това приложение се използва там където не е необходимо плавно регулиране на оборотите, а двигателят трябва да работи на няколко предварително зададени честоти (скорости), избирани от оператора или от управляваща система, като примерни такива приложения могат да се посочат: конвейери, месомелачни, тестомесачни, пълначни и дозиращи машини и др.

Опитната постановка в този случай се състои от контролен пулт, имащ изведени:

- ключ за пуск на системата - ON–OFF–ON, с който се осъществява пуск „Напред/Назад“, свързан към изводи DI1/DI2;

- ключове тип „ON–OFF“ за избор на фиксирани скорости (напр. DI4 = B0, DI5 = B1, DI6 = B2) свързани през обща +24V шина;

- индикаторни лампи свързани към изводи RO1/RO2 (NC за „Готовност“).

Основните параметрични настройки за това приложение са: P17.2 = 0; P1.1 до P1.5 – данни на вид и мощност на използвания двигател; P2.1 = 0, P2.2 = 0, P2.3 = 0. По избор може да бъдат зададени: P2.4 = 4 (Start(edge), Reverse); P3.1 = 5Hz, P3.2 = 50Hz; P3.4 до P3.11 – Preset speeds (напр. 10/20/30/40/50Hz); P4.2 = 3s, P4.3 = 3s; P5.1 = 1 (DI1 – FWD), P5.2 = 2 (DI2 – REV), P5.8 = 4 (DI4 – Preset B0), P5.9 = 5 (DI5 – Preset B1), P5.10 = 6 (DI6 – Preset B2); P7.1 = 2 (RO1 = Run), P7.2 = 3 (RO2 = Fault).

Процедура на провеждане: активират се комбинации от ключове свързани към входове DI4/DI5/DI6 и се наблюдават V1.1/V1.2/V1.4 при 10/20/30/40/50 Hz, без и със натоварване.

Приложение В — Управление с моторен потенциометър (UP–DOWN)

Това приложение се използва в системи с автоматично регулиране, при машини, където изходната честота на инвертора трябва да се променя автоматично според работен цикъл или външен сигнал (например по време, температура

или натоварване). Използва се, когато няма PLC, но е нужна автоматизация чрез аналогова схема или контролер.

Опитната постановка се изгражда със следните външни ключове и индикаторни лампи:

- ключове „ON–OFF–ON“ за управление на „пуск/посока“ свързани към входове DI1/DI2;

- ключ „ON“ свързан към обща +24V шина;

Управление на функцията моторен потенциометър чрез натоварване се получава използвайки функцията за следене на въртящият момент.

Настройка на параметри: P17.2 = 0; P1.1 до P1.5 – въвеждане на каталожни данни за двигателя; P2.1 = 0, P2.2 = 0, P2.3 = 0; P3.1 = 5Hz, P3.2 = 50Hz; P3.3 = 8 (Motorized potentiometer); P3.13 = 5Hz/s (примерен наклон на рампата); P3.14 = 1 или 2 (Reset logic); P4.2 = 3, P4.3 = 3 (по избор втори наклон с параметри P4.4 до P4.6 и избор посредством входове DI); P5.1 = 1 (DI1 – FWD), P5.2 = 2 (DI2 – REV), P8.1 = 13 (използва се за сигнализиране на предварително зададеният лимит в параметър P12.4 чрез зелената контролна лампа на стенда), P12.3 = 2, P12.4 = 20%.

Процедура по провеждане: при натиснат бутон или активиран START чрез спирачния механизъм се прилага натоварване до достигане на зададеното ограничение в параметър P12.4 за плавно повишаване на референтната стойност към 50Hz, като при достигане на максимална изходна честота моторният потенциометър се рестартира отново до минимална изходна честота. Едновременно с това се следят в реално време параметри V1.1/V1.2/V1.4 (изходна честота и ток) без и със натоварване.

След реализирането на основните работните режими и синтезиране на техните входно-изходни управляващи сигнали и настройки в честотния инвертор са заснети експериментални резултати, показващи особеностите при отделните режими. Резултатите са представени таблични и графично в следващите таблици и фигури.

Графиките и табличните данни илюстрират поведението на електрозадвижването при управление чрез честотен инвертор в различни режими и при различни нива на натоварване. Те отразяват основните величини, определящи работата на системата: тока на двигателя, зададената референтна стойност, изходната честота, напрежението към двигателя и температурата на IGBT модула.

Режими на работа при Приложение А - Управление чрез външен потенциометър (AII, 0–10 V).

В таблица 1 са зададените стойности на натоварването в % (в диапазона 0; 20; 50; 80 и 100%), изходната и зададената честоти и времето за работа.

Таблица 1

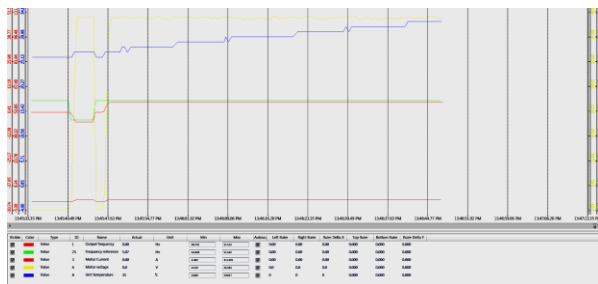
Load mode, [%]					Freq. Ref. [Hz]	Out. Ref. [Hz]	Run time [s]
0	20	50	80	100	5	6,9	10
0	20	50	80	100	10	11,59	10
0	20	50	80	100	20	21,22	10
0	20	50	80	100	30	31,03	10
0	20	50	80	100	40	40,95	10
0	20	50	80	100	50	50,83	10

В таблица 2 са представени стойностите на тока, напрежението и температурата на IGBT модула при различните зададени работни режими в таблица 1.

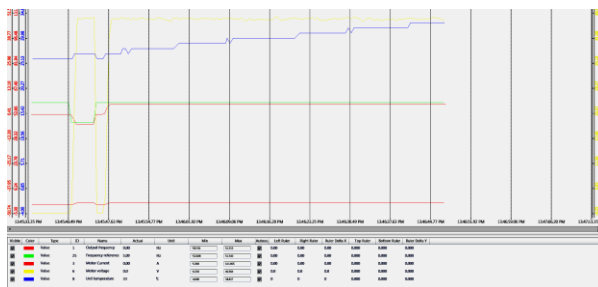
Таблица 2

Motor current, [A]				
1,53	1,48	1,48	1,83	2,31
1,75	1,70	1,89	2,12	2,93
1,89	1,89	1,93	2,30	3,14
1,95	1,95	2,03	2,59	3,64
2,01	2,00	2,31	2,88	4,48
1,83	1,81	1,95	2,90	4,26
Motor voltage, [V]				
66,4	68,3	73,2	92,7	103,2
107,4	115,6	130,7	139,3	181,4
192,3	195,1	209,2	227,4	255,3
279,4	287,4	297	320,6	351,8
369,3	371,2	393	416,7	414,6
441,6	440,3	445,6	442,8	463,8
IGBT Temp., [°C]				
31	33	36	36	35
35	36	36	36	37
36	36	36	36	37
36	36	36	36	37
36	36	36	36	36
35	34	35	35	36

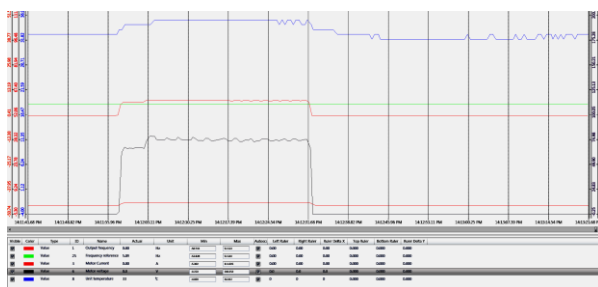
На фиг. 2 до фиг. 6 са показани параметрите на инвертора при различно натоварване в диапазона (0 – 100)%.



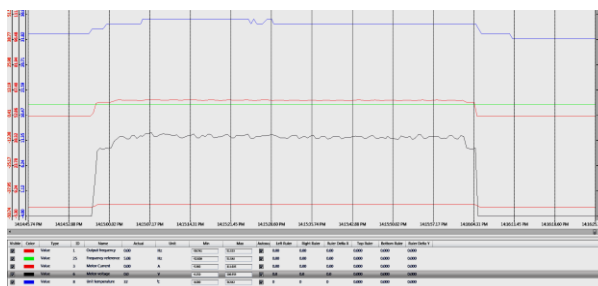
Фиг. 2. Управление с външен потенциометър при 0% натоварване



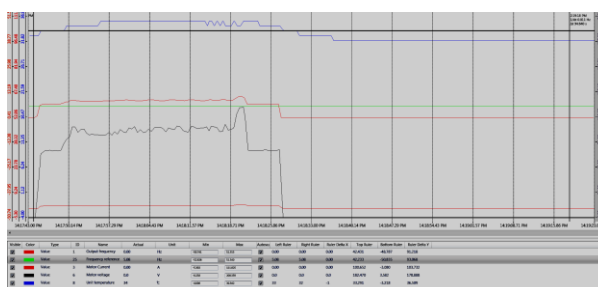
Фиг. 3. Управление с външен потенциометър при 20% натоварване



Фиг. 4. Управление с външен потенциометър при 50% натоварване



Фиг. 5. Управление с външен потенциометър при 80% натоварване



Фиг. 6. Управление с външен потенциометър при 100% натоварване

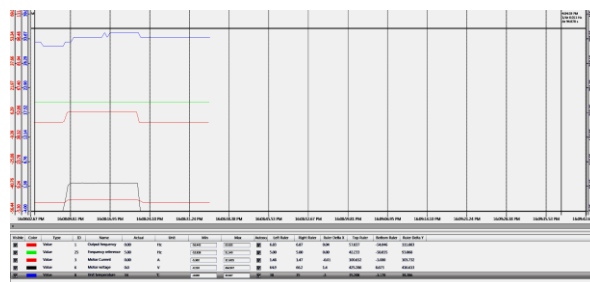
Режими на работа при Приложение Б - Управление с фиксирани скорости (Preset/Fixed Speeds)

В таблица 3 са представени стойностите на тока, напрежението и температурата на IGBT модула при различните зададени работни режими в таблица 1.

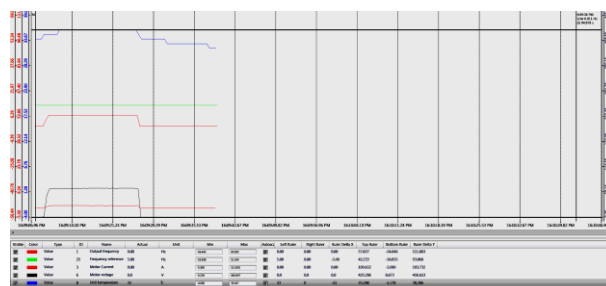
Таблица 3

Motor current, [A]				
1,48	1,48	1,48	1,48	1,48
1,69	1,69	1,69	1,69	1,69
1,88	1,88	1,88	1,88	1,88
1,96	1,96	1,96	1,96	1,96
2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
Motor voltage, [V]				
65,6	65,6	65,6	65,6	65,6
110,2	110,2	110,2	110,2	110,2
192,9	192,9	192,9	192,9	192,9
280,8	280,8	280,8	280,8	280,8
370,2	370,2	370,2	370,2	370,2
435,8	435,8	435,8	435,8	435,8
IGBT Temp., [°C]				
35	36	35	36	35
36	35	35	36	37
35	35	36	36	38
35	36	35	36	38
35	35	35	35	36
35	34	35	36	36

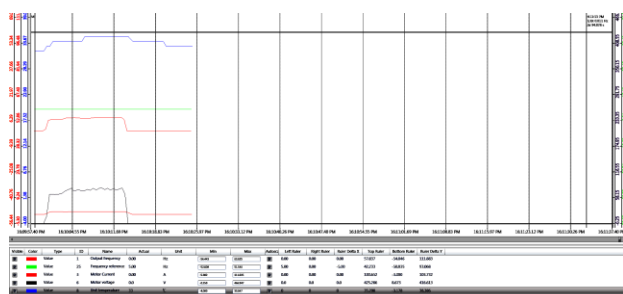
На фиг. 7 до фиг. 11 са показани параметрите на инвертора при различно натоварване в диапазона (0 – 100)%.



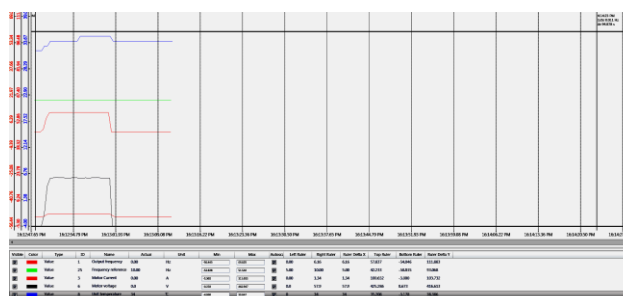
Фиг. 7. Управление с фиксирани скорости при 0% натоварване



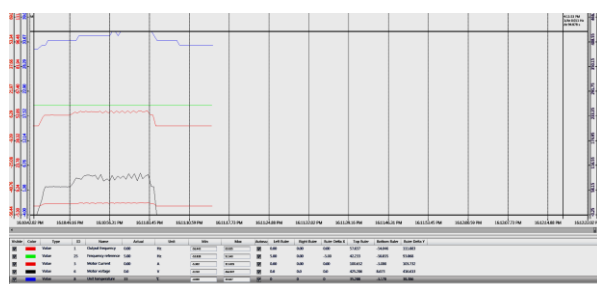
Фиг. 8. Управление с фиксирани скорости при 20% натоварване



Фиг. 9. Управление фиксирани скорости при 50% натоварване



Фиг. 10. Управление с фиксирани скорости при 80% натоварване



Фиг. 11. Управление с фиксирани скорости при 100% натоварване

Режими на работа при Приложение В - Управление с моторен потенциометър (UP-DOWN)

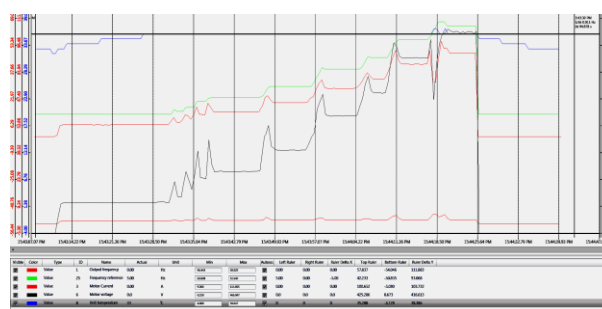
В таблица 4 са представени стойностите на тока, напрежението и температурата на IGBT модула при различните зададени работни режими в таблица 1., а на фиг. 12 показани параметрите на инвертора при различно натоварване в диапазона (0 – 100)%.

Наблюдението на тези параметри (в таблици 2, 3 и 4) позволява да се оцени точността на регулиране, динамичната реакция на системата и съответствието на реалните стойности с очакваните при различни методи на управление. Допълнително включването на температурата на силовия модул предоставя важна ин-

формация относно термичната натовареност и потенциалната надеждност на инвертора.

Таблица 4

Motor current, [A]				
1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
1,89	1,89	1,89	1,89	1,89
1,97	1,97	1,97	1,97	1,97
2,01	2,01	2,01	2,01	2,01
1,84	1,84	1,84	1,84	1,84
Motor voltage, [V]				
66,4	66,4	66,4	66,4	66,4
107,4	107,4	107,4	107,4	107,4
192,3	192,3	192,3	192,3	192,3
279,4	279,4	279,4	279,4	279,4
369,3	369,3	369,3	369,3	369,3
424,4	424,4	424,4	424,4	424,4
IGBT Temp., [°C]				
34	34	34	34	34
35	35	35	35	35
36	36	36	36	36
36	36	36	36	36
36	36	36	36	36
35	35	35	35	35



Фиг. 12. Управление с моторен потенциометър при натоварване 0-100%

Чрез съпоставяне на графичните зависимости и табличните резултати се създава възможност за идентифициране на критични работни точки, оптимизиране на параметрите на управление и оценка на общата устойчивост на задвижването в условия, близки до реалните експлоатационни.

Описаните настройки и процедури позволяват безопасно възпроизвеждане на резултати, наблюдение на влиянието на рампи и натоварване, като подпомагат диагностиката и оптимизацията на класът електрозадвижвания представени като приложения А, Б и В. Наблюдаваните преходни процеси следват рамките

P4.2/P4.3 без осцилации и отскоци на параметрите. При фиксирани скорости се осигурява бърз избор на дискретни работни точки; моторният потенциометър дава възможност за фино ръчно регулиране. Токът нараства равномерно с механичното натоварване на конусния двигател. Подобни динамични аспекти на честотното управление и предизвикателствата при инверторни системи са дискутирани и в съвременни публикации, които разглеждат поведението на електроенергийни системи с висока инверторна наситеност [Al Kez et al., 2023] [5]. При $P1.8 = 1$ (Open loop speed control) се поддържат по-стабилни обороти при частичен товар спрямо $P1.8 = 0$ (Frequency control), като токовият лимит $P1.7$ предотвратява претоварване.

Като се вземат предвид номиналните параметри на системата — номинален ток на двигателя 2.8 A и максимално допустим ток на инвертора 3.3 A — може да се заключи, че изпитванията са проведени при относително малък токов резерв. Въпреки това инверторът демонстрира стабилна работа при всички изследвани режими, включително плавно-то регулиране чрез потенциометър в диапазона 0–100% и фиксирани честоти от 10 до 50 Hz. Особено важно е, че не се наблюдават отклонения или пулсации при работа с ниска честота (10 – 20 Hz), където асинхронните двигатели с механично натоварване близко до номиналното и спирачка обичайно са подложени на повишени токове и риск от нестабилност.

Липсата на прекъсвания във всички режими показва, че инвертора следи, регулира и поддържа изходните токове в граници, които не нарушават допустимите му работни параметри. Това показва правилното функциониране на управлението, достатъчната температурна устойчивост и надеждна работа на силовия електронен модул (наблюдаваните температурни изменения при всички режими са в диапазона 31–38°C) в условията на реално механично натоварване. Ста-

билността на резултатите при 80% и 100% натоварване допълнително потвърждава способността на Vacon20 да осигурява надеждна експлоатация близо до горната граница на своя номинален ток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение може да се обобщи, че честотният инвертор Vacon20 демонстрира висока надеждност и издръжливост в рамките на проведените изпитвания. Той функционира стабилно и предвидимо във всички изследвани работни точки, без признаци на претоварване или нестабилност, въпреки ограничената токова разлика между двигателя и инвертора. Тези резултати показват, че устройството е подходящо за управление на съответния тип двигател и товар и би осигурило надеждна експлоатация в реални и идентични до представените индустриални условия.

***Източник на финансиране:** Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни механизми, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

***Благодарности:** Авторите изказват своята благодарност към рецензентите за насоките и критичните бележки при оформянето на настоящия доклад, както и изказват благодарност към проект BG16RFPR002-1.014-0005.*

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Danfoss Drives, VACON® 20 Application Manual (HVAC), DPD01738A1, UK edition.
- [2] Danfoss Drives, VACON Live – PC tool for parameterization and monitoring, product documentation.
- [3] IEC 60034-1: Rotating electrical machines – Rating and performance.

- [4] Asadi, Y.; Eskandari, M.; Mansouri, M.; Savkin, A.V.; Pathan, E. Frequency and Voltage Control Techniques through Inverter-Interfaced Distributed Energy Resources in Microgrids: A Review. *Energies* 2022, 15, 8580. <https://doi.org/10.3390/en15228580>
- [5] Al Kez, Dlzar & Foley, Aoife & Ahmed, Faraedoon & Morrow, D.J.. (2023). Overview of frequency control techniques in power systems with high inverter-based resources: Challenges and mitigation measures. *IET Smart Grid*. 6. n/a-n/a. 10.1049/stg2.12117.
- [6] S. Mishra, A. Singh and A. N. Tiwari, "Study of Controlling Methods of Inverters used in the Grid in conjunction with renewable energy sources," 2020 International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICE3), Gorakhpur, India, 2020, pp. 200-205, doi: 10.1109/ICE348803.2020.9122884.