

UNIVERSITATEA AGRARĂ DE STAT DIN MOLDOVA

Cu titlu de manuscris
C.Z.U: 621.313.333

ȘAPOVALOV VEACESLAV

**PERFEȚIONAREA DISPOZITIVELOR DE PROTECȚIE A
MOTOARELOR ELECTRICE ASINCRONE TRIFAZATE
UTILIZATE IN AGRICULTURĂ**

**SPECIALITATEA: 255.01 – TEHNOLOGII ȘI MIJLOACE
TEHNICE PENTRU AGRICULTURĂ ȘI DEZVOLTAREA
RURALĂ**

Rezumanul tezei de doctor în științe tehnice

CHIȘINĂU 2019

Teza de doctor a fost elaborată în cadrul Catedrei „Electrificarea agriculturii și bazele proiectării” a Universității Agrare de Stat din Moldova.

Conducător științific:

VOLCONOVICI Liviu, profesor universitar UASM, doctor habilitat în științe.

Referenți oficiali:

BERZAN Vladimir, director adjunct al Institutului de Energetică a AS din PM, doctor habilitat în științe,

STEOPCA Oleg, conferențiar universitar, doctor în științe.

Componenta Consiliului Științific Specializat:

MARIAN Grigore, președinte, profesor universitar UASM, doctor habilitat în științe,

ERHAN Tudor, profesor universitar UASM, doctor habilitat în științe ,

CERNEI Mihail, conferențiar universitar, doctor în științe,

DOBREA Victor, conferențiar universitar, doctor în științe,

POPESCU Victor, conferențiar universitar, doctor în științe,

Susținerea va avea loc la 27 decembrie 2019 ora «12-00» în ședința **Consiliului Științific Specializat - 255.01** din cadrul Facultății «Ingineria Agrară și Transport Auto», al Universității Agrare de Stat din Moldova, pe adresa: MD-2049, mun.. Chișinău, str. Mircești 56, Facultatea «Ingineria Agrară și Transport Auto», etajul 3, bir. 318.

Teza de doctor și autoreferatul pot fi consultate la Biblioteca Republicană Științifică a Universității Agrare de Stat din Moldova și pe pagina web a ANACEC din Republicii Moldova (www.cnaa.md).

Autoreferatul a fost expediat la «25» noembrie 2019.

Secretar Științific al

Consiliului Științific Specializat:

conferențiar universitar, doctor în științe

POPESCU Victor

Conducător științific:

profesor universitar,

doctor habilitat

VOLCONOVICI Liviu

Autor:

ȘAPOVALOV Veaces

© ȘAPOVALOV Veaceslav, 2019

I. CARACTERISTICA GENERALĂ A LUCRĂRII

Relevanța subiectului de cercetare. Motoarele asincrone cu scurtcircuit trifazate din cele mai recente serii sunt considerate cele mai fiabile mașini electrice, dar în agricultură există un procent relativ mare al defecțiunii lor. Acest lucru se datorează în principal, faptului că în timpul funcționării apar condiții care nu au fost planificate în momentul proiectării. Ca urmare, agricultura Republicii Moldova înregistrează pierderi mari din cauza refuzurilor în funcționarea echipamentelor electrice. De exemplu, defectarea unui motor electric de putere joasă sau medie le costă fermelor circa 700-1200 de lei. Pierderile tehnologice cauzate de eșecul motorului, de regulă, depășesc în mod semnificativ costul acestuia. De exemplu, defecțiunea a cel puțin unuia dintre elementele echipamentelor electrice din linia de producție în flux de muls și de prelucrare primară a laptelui la FLM de 200 de capete duce la daune de producție, estimate la aproape 7000 de lei, ceea ce depășește considerabil costul dispozitivului defectat.

Astfel, anual în agricultură este necesar să se restabilească un număr mare de motoare electrice defectate, pentru care se consumă o cantitate impunătoare de materiale deficitare, electricitate și timp costisitor de lucru.

Prin urmare, problema creșterii fiabilității de exploatare a motoarelor electrice în agricultură prin îmbunătățirea protecției lor este relevantă și are o mare importanță economică națională.

Scopul cercetării. Scopul studiului tezei este de a elabora o protecție universală a motoarelor asincrone împotriva principalelor regimuri de avarie.

Obiectivele cercetării. De a analiza tipurile și varietățile de motoare asincrone utilizate în agricultură (pe exemplul sectorului creșterii animalelor). De a analiza condițiile de exploatare și cauza avariilor. De a elaborarea un model matematic specializat pentru calculul parametrilor motoarelor electrice asincrone moderne. De a efectua cercetări privind caracteristicile și proprietățile surselor de semnal de diagnosticare: supraîncărcarea motorului și ruperea fazei rețelei electrice. De a elabora o schemă electrică principală a unui dispozitiv de protecție universal.

Ipoteza științifică a studiului. În procesul studiilor preliminare am descoperit prezența unor armonici superioare în conductorul nul al celei mai recente serii de motoare asincrone trifazate. În acest sens, am sugerat că natura apariției acestor armonici nu este o asimetrie constructivă a rețelei de motoare sau rețelei de alimentare, după cum s-a crezut anterior, ci saturația sistemului său magnetic. Adică, motoarele asincrone din cele mai recente serii sunt elemente magnetice neliniare care generează armonici mai mari în tensiunile de fază și a căror prezență trebuie luată în considerare la elaborarea protecțiilor bazate pe utilizarea tensiunii consecutivității nule în calitate de semnal pentru regimul de accidentare a ruperii fazelor.

Noutatea științifică a cercetării constă în dezvăluirea esenței apariției tensiunilor armonicilor superioare în conductorul nul al unui motor asincron modern. Se propune modelul matematic specializat al unui motor electric asincron, care face posibilă determinarea mărimii tensiunii armonicilor superioare din conductorul nul în regimurile de funcționare și de avarie (cum ar fi ruperea fazelor, blocarea rotorului și suprasarcina). Noutatea științifică a soluțiilor tehnice adoptate este confirmată de trei brevete de autor pe această temă.

Semnificația teoretică a cercetării. Este obținută o argumentare teoretică pentru prezența tensiunilor armonice superioare în conductorul nul al unui motor asincron aflat în procesul de lucru.

Semnificația practică a lucrării constă în faptul că este justificată o diagramă-bloc tipică a dispozitivelor de protecție împotriva ruperilor de fază, a căror funcționare se bazează pe apariția unei tensiuni în sârmă neutră la momentul ruperii în faza de alimentare. Valorile parametrilor și ale caracteristicilor acestui dispozitiv de protecție sunt fundamentate, se definesc circuitele electrice structurale și de bază, se stabilesc capacitățile sale funcționale și domeniul de aplicare. Caracteristicile obținute experimental ale motoarelor asincrone au servit drept bază pentru justificarea și elaborarea sarcinii de proiectare pentru un dispozitiv de protecție universală, adică aducându-l la nivelul unei sarcini ingineresti.

Metodologia cercetării. La efectuarea studiului s-au folosit următoarele metode: metodele de *descriere* și *analiză* în compartimentul "Analiza parcului motoarelor asincrone utilizate în agricultura Republicii Moldova". Metodele de *sinteză* sunt utilizate pentru a rezuma rezultatele studiilor privind caracteristicile sistemului "nul al motorului – nul al rețelei". Metoda de *simulare* – la elaborarea modelului matematic specializat al unui motor asincron. Metoda *ipotețică* - când se determină esența apariției tensiunii în conductorul nul al unui motor asincron.

II. CONȚINUTUL DE BAZĂ AL LUCRĂRII

În **Introducere**, se determină relevanța temei tezei, scopul și obiectivele cercetării, subiectul și obiectul său, noutatea științifică, semnificația teoretică și practică.

În primul capitol al tezei - "**Analiza parcului, condițiilor de lucru și principalilor factori care influențează fiabilitatea de exploatare a motoarelor asincrone de uz agricol, pe exemplul ramurii creșterii animalelor în Republica Moldova**" se analizează parcul motoarelor asincrone de uz agricol și principalii factori care influențează fiabilitatea de exploatare. Sunt expuse principalele motive pentru defectarea lor și dată j scurtă descriere a tipurilor de protecție utilizate.

Analiză parcului de motoare electrice utilizate în ramura creșterii animalelor din Republica Moldova, efectuată pe baza materialelor proiectelor tipice și după rezultatele examenelor nemijlocite

într-un șir de întreprinderi zootehnice din Moldova, a arătat că în procesele tehnologice se utilizează, în special, motoarele electrice de seria A2, AO2, AO2 ... CX, 4A, 4A ... CX cu clasa de izolație E, B, cu puterea de la 0,18 la 75,0 kW. Mai mult, din punct de vedere teritorial, ele sunt distribuite după cum urmează. În încăperile unde sunt nemijlocit întreținute animalele - 39,6%, în secțiile de furaje - 23,9%, în încăperile de prelucrare primară a produselor agricole (săli de muls, lactate, frigidere etc.) - 16,5%. Astfel, aproximativ 80% din motoarele electrice sunt concentrate în incinta zonei de producție în condiții de umiditate ridicată și mediu agresiv chimic.

Dacă se acceptă în mod condiționat că motoarele electrice cu o putere de 0,18-3,0 kW sunt motoare cu puterea mică, 3,0-11,0 kW sunt de putere medie și peste 11,0 kW sunt de putere înaltă, atunci, în conformitate cu aceasta repartizarea motoarelor electrice după putere la obiectele cu destinație agricolă din Moldova va corespunde diagramei din Fig.1.

Din diagramă rezultă că în agricultura Moldovei, aproximativ 60% din numărul total de motoare electrice sunt motoare electrice de putere mică, motoare electrice de putere medie - 32,1%, motoare de putere înaltă doar 7,9%. O astfel de distribuție a motoarelor electrice după putere și o mare parte a motoarelor de putere mică și medie se datorează influenței predominante a unor astfel de ramuri ale agriculturii precum creșterea animalelor.

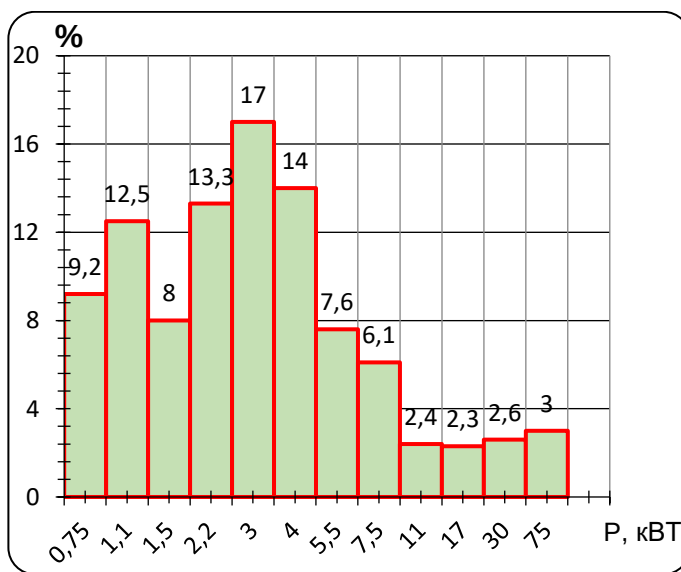


Fig.1. Distribuția motoarelor asincrone după putere (în % din numărul total) la obiectele cu destinație agricolă a R. Moldova. Elaborată de autor.

Aproximativ aceeași imagine a distribuției motoarelor electrice după putere este monitorizată în gospodăriile zootehnice din țările CSI, de exemplu, în Ucraina și Rusia. Potrivit datelor lui I. Mishin,

este posibilă construirea unei diagrame a distribuției motoarelor electrice după putere la o SLM mare din Ucraina (Fig.2).

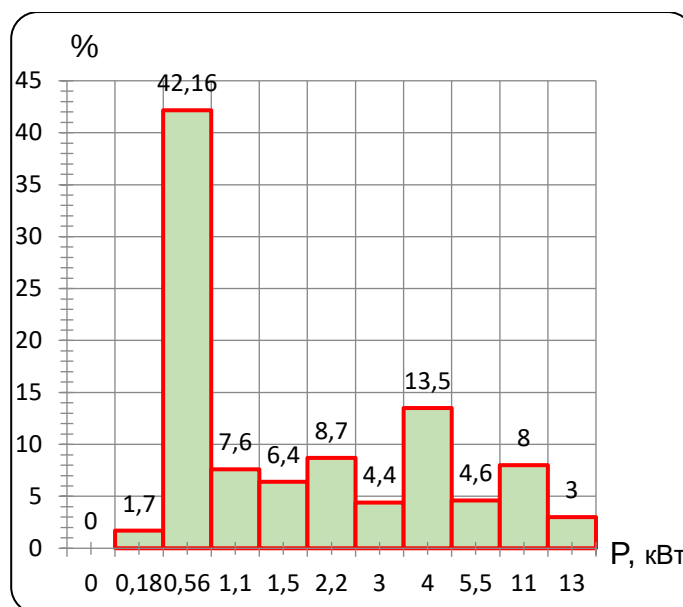


Fig. 2. Distribuția motoarelor asincrone după putere (în % din numărul total) SLM mare din Ucraina. Potrivit datelor lui I. Mishin.

Din diagrama se poate observa că 71% din toate motoarele sunt motoare de putere mică ($P \leq 3,0$ kW), iar 26,1% sunt motoare de putere medie ($3,0 \text{ kW} < P \leq 11,0 \text{ kW}$).

Situația este similară și în regiunile din Federația Rusă, cu o ramură a creșterii animalelor dezvoltată. Potrivit datelor lui V. Kostiuk în gospodăriile din regiunea Volga, mai mult de jumătate (61%) sunt motoarele de o putere de 1,1 ... 3,0 kW.

Potrivit datelor lui A. Mihalchiuk au fost obținute următoarele rezultate ale analizei parcului de motoare electrice utilizate în sectorul creșterii animalelor din regiunile Vologda, Yaroslavl și Vladimir din Federația Rusă (diagrama cercului din Figura 3).

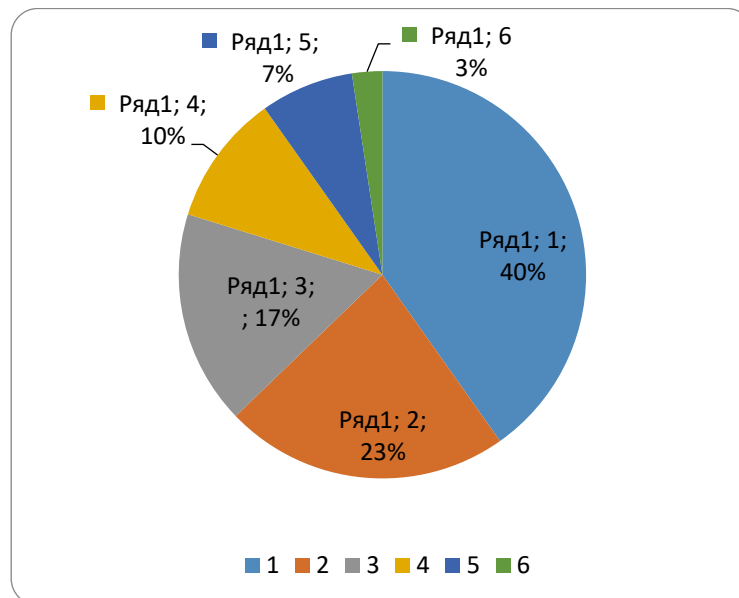


Fig. 3. Diagrama cercului de distribuție a motoarelor electrice după putere (P), (în % din numărul total de motoare, utilizate în agricultura FR).

Potrivit datelor lui A. Mihalchiuk.

1.1	P= 0.18 – 0.75 кВт	40,2%
1.2	P= 0.75 – 3.0 кВт	22,6%
1.3	P= 3.00 – 11.0 кВт	17,0%
1.4	P=11.00 – 18.5 кВт	10,4%
1.5	P=15.50 – 30.0 кВт	7,4%
1.6	P=30.00 – 55.0 кВт	2,4%

Analiza efectuată a parcului de motoare electrice utilizate în agricultura Republicii Moldova, în special în domeniul zootehnic, ne permite să tragem câteva concluzii.

1. Motoarele utilizate în sectorul zootehnic reprezintă mai mult de 60% din toate motoarele electrice utilizate în agricultură. Acestea sunt concentrate în principal (mai mult de 80%) în spațiile din zona de producție cu un mediu dăunător.
2. În aceste obiecte, în special, se utilizează motoarele electrice asincrone cu rotorul în scurtcircuit din seriile AO, AO2, 4A și 4A CX atât cu destinație de producție generală, cât și specială (dintre care cele mai multe sunt motoare din seria AO2 și 4A).
3. Peste 90% din toate motoarele utilizate în sectorul zootehnic sunt motoarele cu capacitate redusă și medie, mai mult ca atât, motoarele de putere mică (0,18-3,0 kW), reprezintă aproximativ 60%.
4. Motoarele cu numărul de perechi de poli egale cu patru (adică 1500 rot/min de viteză sincronă) au cea mai mare aplicație (mai mult de 70,0%).

După cum reiese din rezultatele studiilor efectuate, factorii importanți care influențează semnificativ fiabilitatea operațională a motoarelor asincrone sunt **condițiile de mediu**. De regulă, ele se caracterizează prin fluctuații puternice ale temperaturii, umiditate ridicată, prezența unei cantități semnificative de gaze agresive, praf.

Investigațiile mediului înconjurător în încăperile zootehnice ale mai multor gospodării din Moldova au arătat că în încăperile zootehnice care nu sunt utilizate cu un sistem de ventilație, valorile umidității relative ating 95-98%, conținutul de amoniac este de 0,09 g / m³, dioxidul de carbon este de 14,7 g / m³, ceea ce de 4-6 ori depășesc normele permise de STAS 15150 (condiții climaterice). Lucrând în astfel de condiții, izolația motoarelor electrice se învechește intens, ceea ce devine unul dintre motivele pentru reducerea fiabilității acestora.

În prezent, industria produce motoare electrice speciale de menire agricolă (cu indicele CX) destinate lucrărilor în încăperi cu umiditate relativă ridicată și în prezența gazelor agresive, precum și a prafului volatil și temperaturilor mediului de până la +40 ° C. Cu toate acestea, utilizarea în producția agricolă a motoarelor seriei speciale 4A CX este inefficientă din punct de vedere economic. În plus, fluxul acestor motoare în economia republicii, e foarte limitat și nu depășește 15-17% din numărul lor total.

În mare măsură, fiabilitatea operațională a motoarelor electrice e determinată, de asemenea, de **regimurile de funcționare** a acestora. Acestea din urmă, la rândul lor, se caracterizează prin gradul de sarcină și durata de funcționare.

În literatura tehnică au fost selectate numeroase materiale statistice privind raportul cantitativ al cauzelor defecțiunilor motoarelor asincrone din ramura agriculturii.

Departamentul "Electrificarea agriculturii și conducerii electrice" al Universității Tehnice din Chișinău a efectuat, de asemenea, un studiu al eficienței funcționării motoarelor electrice în condițiile agriculturii din Moldova și motivele defecțiunii lor. În acest caz au fost utilizate două metode:

- întocmirea registrului de defecțiuni ale motoarelor electrice
- exploatarea controlată a motoarelor electrice.

La compilarea datelor din studiile efectuate și datelor din surse literare, defecțiunile motoarelor electrice din motivele principale pot fi distribuite după cum urmează:

- Suprasarcini îndelungate - 30-35%.
- Regimul fazei incomplete - 19-25%.

- Blocarea rotorului - 15-17%.
- Umezirea și murdărirea izolației înfășurării - 15%.
- Perturbarea răcirii - 5%.
- Defecțiuni mecanice și defecte de fabricare - 10%

Astfel, datele prezentate arată, că aproximativ 70% din motoare se defectează din cauza supraîncărcărilor tehnologice și de avarie, a defecțiunilor de fază ale rețelei de alimentare și a blocării rotorului.

În capitolul doi al tezei de doctorat "**Studii teoretice și experimentale ale sistemului “nul al motorului – nul al rețelei” ca sursă de alarmă de avariere a fazelor**", sunt examinate problemele fundamentării teoretice a apariției armonicilor superioare ale tensiunii în conductorul nul a unui motor asincron, pe cale experimentală sunt determinați factorii care influențează magnitudinea acestei tensiuni și limitele modificării acesteia.

Argumentarea teoretică a apariției în conductorul nul al motorului asincron trifazat a unor armonici mai superioare a tensiunii.

După cum rezultă din cursul BTE între nodul nul al unei rețele trifazate și nodul nul al unui consumator trifazat conectat în stea, tensiunea apare într-un mod asimetric. Pe acest fenomen poate fi bazată protecția consumatorilor trifazați de la regimurile nesimetrice și, în special, de la o întrerupere a fazei de alimentare a motoarelor asincrone.

Tensiunea dintre nodurile nule ale motorului (01) și sursa de alimentare (0) în acest timp este determinată de formula (1):

$$U_{oo'} = \frac{U_A Y_A + U_B Y_B + U_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} \quad (1)$$

unde: $U_{oo'}$ - tensiune dintre nodul nul și rețeaua de alimentare;

$U_A; U_B; U_C$ - tensiunea fazelor sursei;

$Y_A; Y_B; Y_C$ - conductanța completă a fazelor motoarelor.

În absența unui conductor nul și a unei rupturi de fază, tensiunea $U_{oo'}$ atinge o valoare $\frac{U_\phi}{2}$. În acest caz, tensiunea pe celelalte două faze ale sarcinii este egală cu valoarea $\frac{U_{AB}}{2}$. În schemele circuitelor de protecție a motoarelor electrice, tensiunea specificată $U_{oo'}$ este fixată de un servomotor

(releu), instalat în conductorul nul și care acționează pentru a opri motorul electric prin schema de comandă.

Practica exploatarea unor astfel de protecții împotriva ruperii de fază bazată pe filtrarea consecutivității nule a arătat că, în multe cazuri, acestea sunt declanșate fals. În lucrările lui Galiuk A. și Grundulis A. se dă o analiză a funcționării unor astfel de protecții și a motivelor declanșării lor false. Potrivit acestor autori, declanșarea falsă a unor astfel de dispozitive se datorează prezenței între nodurile nule ale rețelei și motorului, chiar și în regimul de alimentare simetrică, tensiunii (U_0) condiționată de o anumită nesimetrie a sistemului electric al motorului însuși. În plus, dacă tensiunea din rețeaua trifazată nu este simetrică, apare între aceste noduri o tensiune de nesimetrie (U_0), a cărei magnitudine și unghiul de fază depind de structura nesimetriei rețelei și de alunecarea motorului. Dacă există o nesimetrie variabilă a rețelei însăși, unghiurile de fază ale acestor tensiuni (U_0 și U_0) pot coincide. În acest caz, tensiunea de însumare devine maximă și protecția este declanșată, deși nu există o rupere de fază.

$$U_{0 \max} = U_0' + U_0'' \quad (2)$$

Studiile noastre au arătat că, chiar și în cazul simetriei absolute a tensiunilor de fază ale motorului între nodurile neutre ale motorului și ale rețelei, există o tensiune U_0 . Prin urmare, am sugerat presupunerea că natura aspectului său nu este nesimetria constructivă a motorului, ci saturația sistemului magnetic al motorului, adică motoarele asincrone din cele mai recente serii în plan magnetic sunt elemente neliniare care generează armonici mai superioare ale tensiunii de fază care apar în conducta nulă și a căror prezență trebuie luată în considerare atunci când se elaborează o protecție bazată pe utilizarea tensiunii consecutivității nule în calitate de semnal pentru un regim de avarie a fazelor.

Având în vedere caracterul neliniar al mediului feromagnetic, în condiții de saturație magnetică a conductei magnetice al motoarelor asincrone moderne, chiar și distribuției sinusoidale a curbei t.c.m. în spațiul de aer al motorului îi corespunde unda nesinusoidală a inducției magnetice. Această undă nesinusoidală de inducție magnetică poate fi descompusă într-o serie de armonici sinusoidale impare (metoda lui Fourier). În acest caz, armonicile 1 și 3 vor fi cele mai pronunțate. Aceste armonici (spre deosebire de armonicile spațiale, condiționate de caracterul nesinusoidal t.c.m.), sunt rezultatul saturației sistemului magnetic al motorului. Asemenea armonici se numesc **armonici de saturație**.

Rotindu-se cu viteza câmpului magnetic principal, unda spațială nesinusoidală a inducției magnetice $B(t, \gamma)$, definită prin formula (3), induce o forță electromotoare în fiecare fază a motorului, conținând armonici impare (în principal prima și a treia), definite prin formulele (4).

$$B(t \cdot \gamma) = B_{M1} \sin(\omega_1 \cdot t - p\gamma_1) + B_{M3} \sin 3(\omega_1 \cdot t - p_1 \cdot \gamma) \quad (3)$$

unde: B_{M1}, B_{M3} - respectiv amplitudinea inducției magnetice a primei și a treia armonici

ω_1 - frecvența unghiulară,

p_1 - numărul de perechi de poli statorici,

γ - unghi spațial.

$$\begin{aligned} e_{ad} &= E_{m1} \cos \omega_1 \cdot t + E_{m3} \cos 3\omega_1 \cdot t \\ e_{cd} &= E_{m1} \cos(\omega_1 \cdot t + 2\pi / 3) + E_{m3} \cos 3\omega_1 \cdot t \\ e_{bd} &= E_{m1} \cos(\omega_1 \cdot t - 2\pi / 3) + E_{m3} \cos 3\omega_1 \cdot t \end{aligned} \quad (4)$$

unde: E_{m1} și E_{m3} - respectiv amplitudinea forței electromotoare a primei armonici și armonicii a treia,

ω_1 și ω_3 - frecvența unghiulară a primei armonici și armonicii a treia.

Ținând cont de aceasta, vom determina tensiunea dintre motorul nău și rețeaua năuă (punctele 0 și 0') în conformitate cu metoda a două noduri (Fig.4.) conform formulei (5).

$$U_0 = \frac{(e_{at} + e_{ad})g_a + (e_{bt} + e_{bd})g_b + (e_{ct} + e_{cd})g_c + (i_a + i_b + i_c)}{g_a + g_b + g_c} \quad (5)$$

unde: e_{at}, e_{bt}, e_{ct} - forța electromotoare a înfășurărilor secundare din transformatorul T al sistemului de alimentare a transformatorului,

e_{ad}, e_{bd}, e_{cd} - forța electromotoare a înfășurărilor motorului M,

g - conductanța ramurilor în faze,

i - curenții în faze.

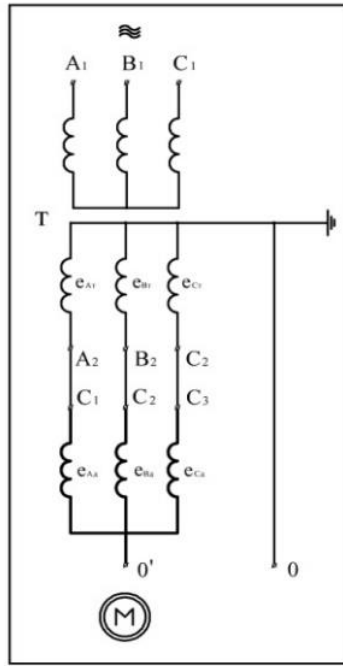


Fig. 4. Schema calculului tensiunii dintre nodurile O și O' după metoda a doua noduri.

Pentru un transformator simetric T , un motor simetric M și un cablu de alimentare simetric, forța electromotoare a transformatorului - $e_{at} \cdot e_{bt} \cdot e_{ct}$ au formă sinusoidală și au aceeași amplitudine, deci suma produselor lor $e_{at} \cdot g_a + e_{bt} \cdot g_b + e_{ct} \cdot g_c$ - este egală cu zero. Suma curenților din ramuri în faze este, de asemenea, egală cu zero $i_a + i_b + i_c$. Atunci ecuația (5) ia forma:

$$U_{.0} = \frac{e_{ad} \cdot g_a + e_{bd} \cdot g_b + e_{cd} \cdot g_c}{3g} . \quad (6)$$

Înlocuind în formula (6) valorile forței electromotoare $e_{ad} \cdot e_{bd} \cdot e_{cd}$ din ecuația (4) obținem:

$$U_0 = E_{m3} \cos \cdot 3\omega_1 \cdot t \quad (7)$$

Astfel, în motoarele electrice asincrone trifazate cu rotorul în scurtcircuit cu un sistem magnetic saturat, chiar și cu o simetrie structurală absolută a motorului și o putere absolut simetrică, între nodul neutru al înfășurării statorului și nodul neutru al rețelei, apare o tensiune sinusoidală de o frecvență înțreită.

Când una dintre faze se rupe, între nodurile indicate mai sus ($00''$), apare tensiunea nulă de consecutivitate a armonicii principale cu o frecvență de 50 Hz, care se adaugă la tensiunea armonicii a treia cu o frecvență de 150 Hz. Acest lucru este demonstrat de forma tensiunii $U_{00'}$ obținută prin oscilografie (Fig.5). Evident, pentru a configura corect un dispozitiv de protecție împotriva ruperilor

de fază bazat pe apariția tensiunii între aceste noduri, este necesar să cunoaștem valorile cantitative ale tensiunii U'_0 și factorii care afectează valoarea acesteia.

Pentru a confirma presupunerile teoretice menționate, s-au efectuat calcule (folosind modelul matematic specializat elaborat) și s-au efectuat studiile experimentale corespunzătoare.

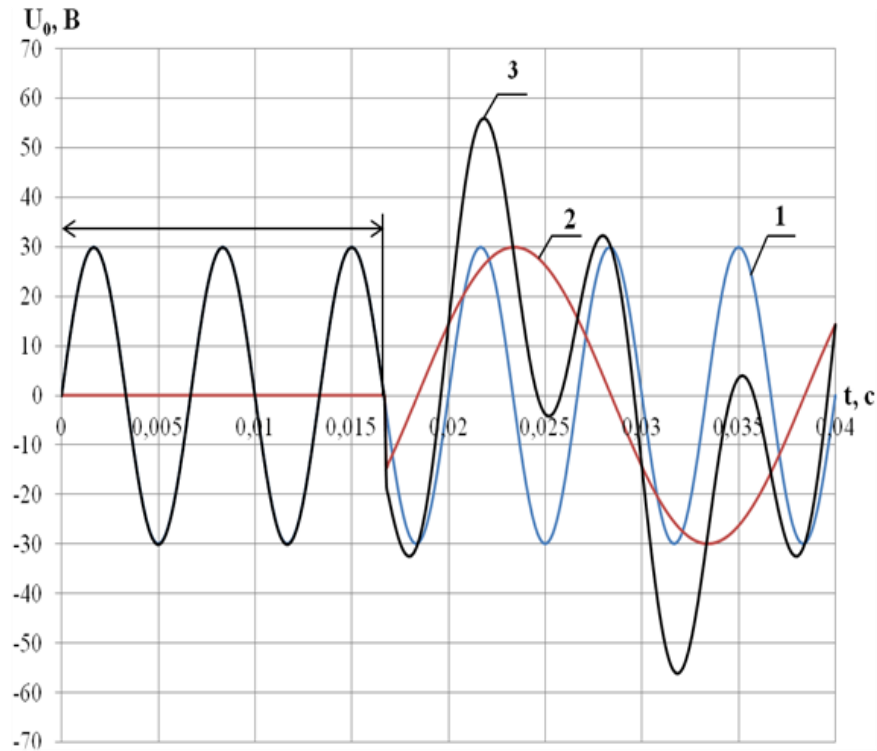


Fig.5. Caracterul modificării tensiunii U_0 pentru motorul 4A80B4Y3 în cazul ruperii fazei în regimul XX (mersului în gol). (cu săgeată se arată momentul ruperii fazei rețelei)
 1 – componenta tensiunii U_0 , cu frecvența $f = 150\text{Hz}$,
 2 – componenta tensiunii U_0 , cu frecvența $f = 50\text{Hz}$,
 3 – tensiunea totală U_0 a ambelor componente.

Elaborată de autor.

Elaborarea unui model matematic specializat a motorului electric asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit cu un sistem magnetic saturat.

Din sursele literare studiate, starea fizică cea mai corectă a unei mașini electrice saturate poate fi descrisă de un model matematic al unui traductor electromecanic, dat în lucrările academicianului Kopâlov A. Modelul examinează o mașină electrică saturată, dar neliniaritatea sa este luată în considerare de caracteristica magnetizării circuitului magnetic principal, în admiterea unei distribuții sinusoidale a forțelor magnetomotorii (f.m.m) ale înfășurărilor și ale câmpului magnetic. Un astfel de model nu poate calcula tensiunea armonicilor superioare, care apar în conductorul nul al motoarelor

asincrone de ultimele serii și care pot fi utilizate ca sursa alarmei de avarie în fază. Pe baza faptelor expuse anterior, putem considera oportun de a completa tipurile existente de modele matematice cu un model matematic specializat.

Modelul matematic propus al unei mașini asincrone conține următoarele ecuații:

- echilibrul electric al circuitelor statorului și rotorului;
- starea magnetică (numărul lor poate fi diferit și depinde de nivelul de detaliere a conductorului magnetic; la rândul său, nivelul de detaliere este determinat de specificul sarcinilor care trebuie îndeplinite, de necesitatea obținerii unei precizii date etc.)
- conversia energiei electromecanice.

Vom prezenta ecuațiile de mai sus în formă vectorială:

$$\begin{cases} \frac{d(\omega_0 \vec{\Psi})}{d\tau} + \vec{i} \cdot R - \vec{U} = 0 & (8) \\ \omega_0 \vec{\Psi} = \omega_0 \vec{\Psi}(\vec{\varphi}, \vec{i}) & (9) \\ f(\vec{\varphi}, \vec{i}) = 0 & (10) \\ M_s - M_c - J \frac{d\omega}{d\tau} = 0 & (11) \end{cases}$$

unde: $\vec{\Psi}$, $\vec{U}$, $\vec{i}$, $\vec{\varphi}$ – vectorii cuplajelor de flux, tensiunilor, curenților și fluxurilor magnetice sincrone al schemei de înlocuire în circuitului magnetic;

$\omega_0 = 2\pi \cdot f$ - viteza sincronă unghiulară;

$\tau = \omega_0 \cdot t$ - timpul sincron;

R – matricea rezistențelor active ale contururilor electrice;

ω – viteza de rotire a rotorului;

M_c – momentul de rezistență pe arborele motorului, care este o funcție cunoscută a vitezei;

J – momentul de inerție a părților rotative;

M_s – momentul electromagnetic dezvoltat de motor și determinat conform formulei:

$$M_s = \frac{P}{\omega_0 \sqrt{3}} [\omega_0 \Psi_A \cdot (i_B - i_C) + \omega_0 \Psi_B \cdot (i_C - i_A) + \omega_0 \Psi_C \cdot (i_A - i_B)] \quad (12)$$

Pentru rezolvarea comună a ecuațiilor (8-10), vom prezenta ecuațiile (9-10) la o formă diferențiată, pentru care, conform metodicii, le diferențiem ca funcții complexe în raport cu variabila independentă τ :

$$\frac{d(\omega_0 \vec{\Psi})}{d\tau} = \frac{\partial(\omega_0 \vec{\Psi})}{\partial \vec{i}} \cdot \frac{d\vec{i}}{d\tau} + \frac{\partial(\omega_0 \vec{\Psi})}{\partial \vec{\varphi}} \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial \tau} \quad (13)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \vec{\varphi}} \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial \tau} + \frac{\partial f}{\partial \vec{i}} \cdot \frac{\partial \vec{i}}{\partial \tau} = 0 \quad (14)$$

Introducem notările:

$$\frac{\partial(\omega_0 \vec{\Psi})}{\partial \vec{l}} = A_{11}; \quad \frac{\partial(\omega_0 \vec{\Psi})}{\partial \vec{\varphi}} = A_{12}; \quad \frac{\partial f}{\partial \vec{\varphi}} = A_{22}; \quad \frac{\partial f}{\partial \vec{l}} = A_{21}; \quad (15)$$

unde A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} , matrice ale derivatelor parțiale corespunzătoare.

Luând în considerație (13), (14) și (15), ecuațiile (8), (9) și (10)

vor primi forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(\omega_0 \vec{\Psi})}{d\tau} + \vec{l} \cdot R - \vec{U} = 0 \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(\omega_0 \vec{\Psi})}{d\tau} = A_{11} \cdot \frac{\partial \vec{l}}{\partial \tau} + A_{12} \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial \tau} \end{array} \right. \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{22} \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial \tau} + A_{21} \cdot \frac{\partial \vec{l}}{\partial \tau} = 0 \end{array} \right. \quad (18)$$

Din ecuația (17) vom obține:

$$\frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial \tau} = -A_{22}^{-1} \cdot A_{21} \cdot \frac{\partial \vec{l}}{\partial \tau} \quad (19)$$

unde: A_{22}^{-1} - matricea, inversă matricei A_{22} .

Înlocuim (18) în (16):

$$\frac{d(\omega_0 \vec{\Psi})}{d\tau} = (A_{11} - A_{22}^{-1} \cdot A_{21} \cdot A_{12}) \cdot \frac{\partial \vec{l}}{\partial \tau} \quad (20)$$

Vom nota:

$$(A_{11} - A_{22}^{-1} \cdot A_{21} \cdot A_{12}) = S_\psi \quad \text{și} \quad (-A_{22}^{-1} \cdot A_{21}) = S_\varphi \quad (21)$$

În forma generală matricele S_ψ și S_φ au forma:

Atunci luând în considerație ecuațiile (20) și (21), ecuațiile (8 - 11) vor fi înscrise sub forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(\omega_0 \vec{\Psi})}{d\tau} + \vec{l} \cdot R - \vec{U} = 0 \end{array} \right. \quad (22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(\vec{\varphi})}{\partial \tau} = S_\varphi \cdot \frac{\partial \vec{l}}{\partial \tau} \end{array} \right. \quad (23)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(\omega_0 \vec{\Psi})}{\partial \tau} = S_\psi \cdot \frac{\partial \vec{l}}{\partial \tau} \end{array} \right. \quad (24)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_s - M_c - I \frac{d(\omega)}{d\tau} = 0 \end{array} \right. \quad (25)$$

Astfel, a fost obținut un sistem de ecuații diferențiale obișnuite ale unui model matematic al unei mașini asincrone. Integrând numeric aceste ecuații în timp sincron τ , obținem o familie de curbe integrale

$$\vec{\varphi} = \vec{\varphi}(\tau), \quad \omega_0 \vec{\Psi} = \omega_0 \vec{\Psi}(\tau), \quad \vec{l} = \vec{l}(\tau), \quad M_s = M(\tau). \quad (26)$$

Aceste curbe descriu caracteristicile mașinii electrice, atât în regim de tranziție, cât și în regim de echilibru.

Pe baza modelului matematic prezentat, a fost dezvoltat un program de calculator. Programul a fost elaborat în număr de 377 operatori utilizând aplicații matematice corespunzătoare sub formă de programe și subprograme. Programul vă permite calcularea parametrilor necesari ai motorului asincron. Inclusiv: valorile curenților de fază, inducția magnetică pe orice segment al circuitului magnetic al motorului electric și tensiunea sistemului „nul al motorului – nul al rețelei”. Parametrii necesari ai motorului electric pot fi determinați și tipăriți în mod normal și în regim de avarie în orice moment. Studiile experimentale au arătat că calculele efectuate folosind un model matematic sunt adecvate cu rezultatele studiilor experimentale cu o eroare relativă de cel mult 5 - 7%.

Studii experimentale ale sistemului „nul al motorului – nul al rețelei” ca sursă a semnalului de avarie a ruperii fazei.

Au fost determinate obiectul, obiectivele și programul de cercetare.

Obiectul de studiu este sistemul nul al motorului - nul al rețelei.

Scopul studiului este de a obține o serie de caracteristici ale nul al motorului – nul al rețelei necesare pentru proiectarea și elaborarea unui dispozitiv de protecție a motorului pentru regimul de avarie, în cazul unei ruperi de fază în rețeaua de alimentare.

În conformitate cu programul și metodologia de cercetare, am efectuat studiile experimentale corespunzătoare. În procesul studiului, s-a constatat că valoarea absolută a celei de-a treia tensiuni armonice este complet determinată de gradul de saturație a sistemului magnetic al unui motor electric asincron și depinde de următorii factori: tensiunea de rețea, alunecarea motorului, puterea motorului și numărul de perechi de poli de motor. Valoarea maximă a acestei tensiuni corespunde regimului mersului în gol al motoarelor electrice asincrone. Odată cu creșterea alunecării de la regimul mersului în gol până la oprirea completă a rotorului, mărimea tensiunii specificate scade cu aproximativ 30-35%. Odată cu creșterea tensiunii de rețea, această tensiune crește iar, odată cu creșterea puterii motoarelor electrice asincrone și scăderii numărului de perechi de poli, tensiunea scade.

O parte din rezultatele obținute este prezentată în autoreferat sub formă de grafice din Fig.6 -9.

Calculele și studiile experimentale efectuate au confirmat ipoteza că într-un motor asincron trifazat, cu rotorul în scurtcircuit, care funcționează, chiar și într-un regim de alimentare complet simetric, în conductorul nul generează o tensiune sinusoidală cu o frecvență întreită ($f = 150 \text{ Hz}$) natura căreia este saturația magnetică a motorului.

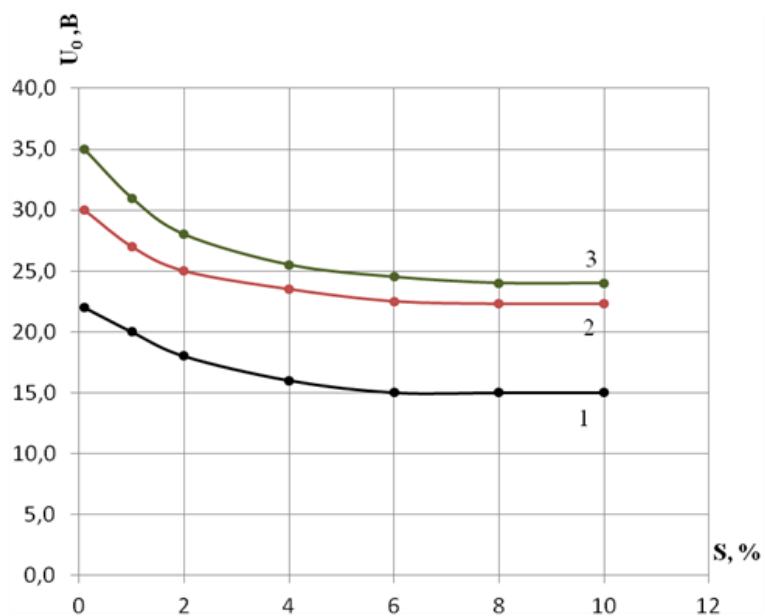


Fig.6. Dependența tensiunii neutre (U_{00}) de alunecarea motorului (S), $P_n = 1.5$ kW, cu un număr diferit de perechi de poli (p).
Linia 1–(cu $p=1$). Linia 2–(cu $p=2$). Linia 3–(cu $p=3$).
Elaborată de autor.

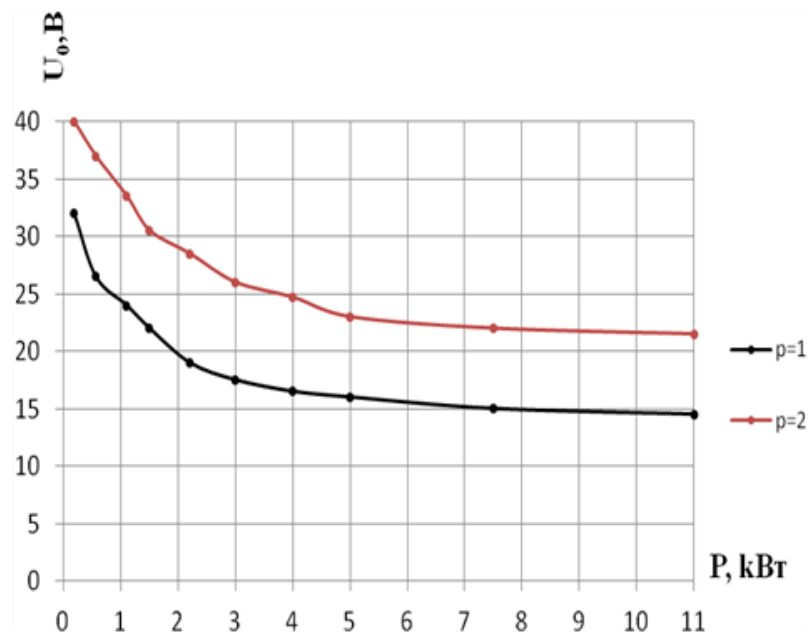


Fig. 7. Dependența tensiunii neutre (U_{00}) de puterea motorului (P) cu un număr diferit de perechi de poli (p).
Linia 1 – (cu $p=1$). Linia 2 – (cu $p=2$).
Elaborată de autor

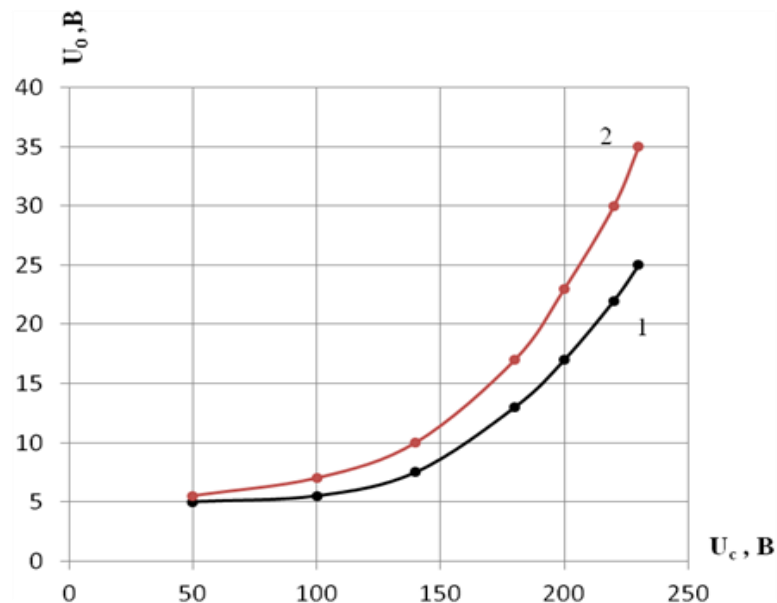


Fig8. Dependența tensiunii neutre (U_{00}) de tensiunea rețelei de alimentare (U_c) pentru motoarele de 1,5 kW număr diferit de perechi de poli (p). Linia 1 – (cu $p=1$). Linia 2 – (cu $p=2$).
Elaborată de autor.

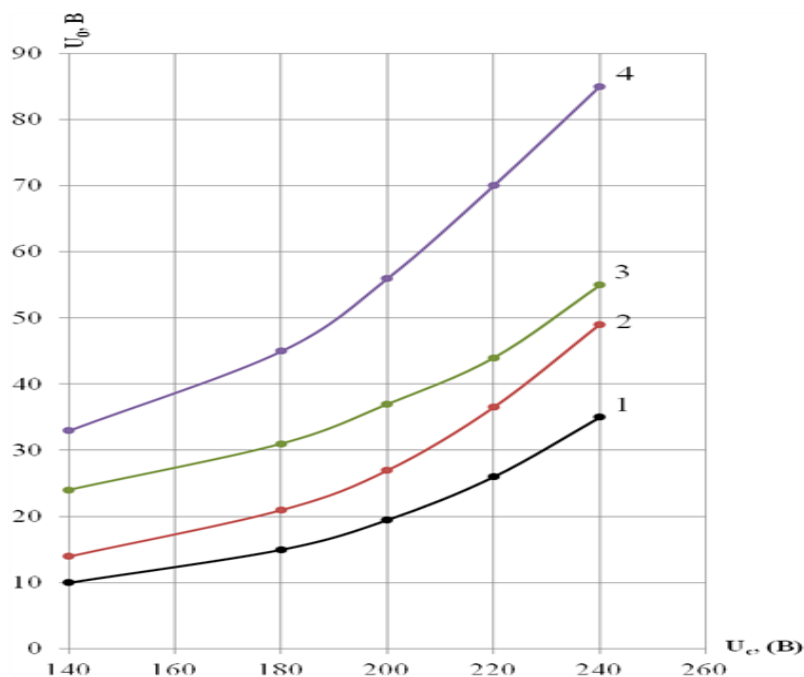


Fig. 9 Dependența tensiunii (U_{00}) de tensiunea rețelei de alimentare (U_c) pentru motoarele de 0,55 kW cu număr diferit de perechi de poli (p):
Liniile 1,2 în regimul mersului în gol la alimentarea simetrică.
(linia 1 cu $p=1$, linia 2 cu $p=2$);
Liniile 3,4 în regimul mersului în gol și ruperii fazei.
(linia 3 cu $p=1$, linia 4 cu $p=2$).
Elaborată de autor.

În capitolul trei „**Elaborarea și studiul unui dispozitiv universal pentru protecția motorului asincron trifazat împotriva suprasarcinii de avarie și ruperii de fază**” sunt examinate problemele studiului traductoarelor primare de curent - senzorilor de curent, elaborarea schemei principale și structurale electrice a unui dispozitiv de protecție universal, precum și calculul efectului economic preconizat din aplicarea dispozitivului de protecție propus.

În conformitate cu scopul propus, dispozitivul de protecție în curs de elaborare trebuie să îndeplinească funcțiile de protejare a motorului electric împotriva celor mai frecvente condiții de avarie, cum ar fi supraîncărcarea, blocarea rotorului, ruperea fazei. reieșind din aceasta, schema structurală a dispozitivului ar trebui să conțină o serie de blocuri structurale necesare. Printre ele se numără:

- Traductoare primare (senzori de alarmă).
- Elemente de prag (necesare pentru reglarea de la semnalele posibile ale indicatoarelor de curent și care nu se consideră de avarie).
- Elemente de expunere a timpului (necesare pentru reglarea de la curenții de intrare și a supraîncărcărilor mici sau pe termen scurt).
- Elemente pentru compararea semnalelor de la traductoarele primare și semnalele de referință pentru concluzia logică, că semnalul este o alarmă.
- Blocul de alimentare cu elemente electronice a circuitului de protecție.
- Mecanism executoriu pentru comutarea rețelei de forță a motorului electric.

Având în vedere un larg sortiment de traductoare primare fabricate de industrie - indicatoare de curent, am sugerat o presupunere ca toate indicatoarele de curent fabricate sunt destinate pentru dispozitive tehnice specifice cu o capacitate determinată concretă. Prin urmare, pentru dispozitivul de protecție universal în curs de elaborare, conceput pentru o gamă largă de puteri ale motorului, ele nu se vor potrivi. Sunt necesare studii de verificare corespunzătoare și îmbunătățiri constructive.

Ținând cont de acest fapt, au fost luate în considerare mai multe variante ale indicatorilor de curent disponibili pentru diferite dispozitive și agregate, utilizate în diverse procese tehnologice. Studiile preliminare au arătat că cel mai potrivit dintre ele, pentru dispozitivul de protecție în curs de elaborare, este indicatorul de curent utilizat în stațiile de control pentru pompe electrice imersibile de tipul IIIЭT 5801-0362Г-Y2.

În conformitate cu programul de cercetare și metodologia executării lucrărilor, au fost efectuate studii experimentale relevante. În procesul studiilor a fost implicat indicatorul de curent de fabrică utilizat în stațiile de control pentru pompe electrice submersibile de tip IIIЭT 5801-0362G-U2 și un indicator după reconstrucția sa. În acest scop, în indicatorul de fabrică în miezul mijlociu al

conductorului magnetic a fost executat un joc de aer $\delta = 0,1$ mm. Prezența unui joc de aer asigură funcționarea indicatorului într-un regim magnetic nesaturat pe întreaga gamă de puteri necesare a motoarelor studiate. După prelucrarea statistică, rezultatele studiilor experimentale au fost prezentate sub formă de tabele și grafice. În Figura 10 și Figura 11 sunt prezentate unele dintre rezultatele cercetărilor privind indicatorul reconstruit.

S-au determinat parametrii de proiectare necesari ai indicatorului de curent reconstruit.

- numărul de spire ale înfășurării primare $W_1 = 16$,
- numărul de spire ale înfășurării secundare $W_2 = 800$;
- dimensiunea jocului de aer (δ) din circuitul magnetic al indicatorului $\delta = 0,1$ mm;
- rezistență optimă de încărcare a înfășurării secundare $R_2 \geq 10,0$ k Ω .

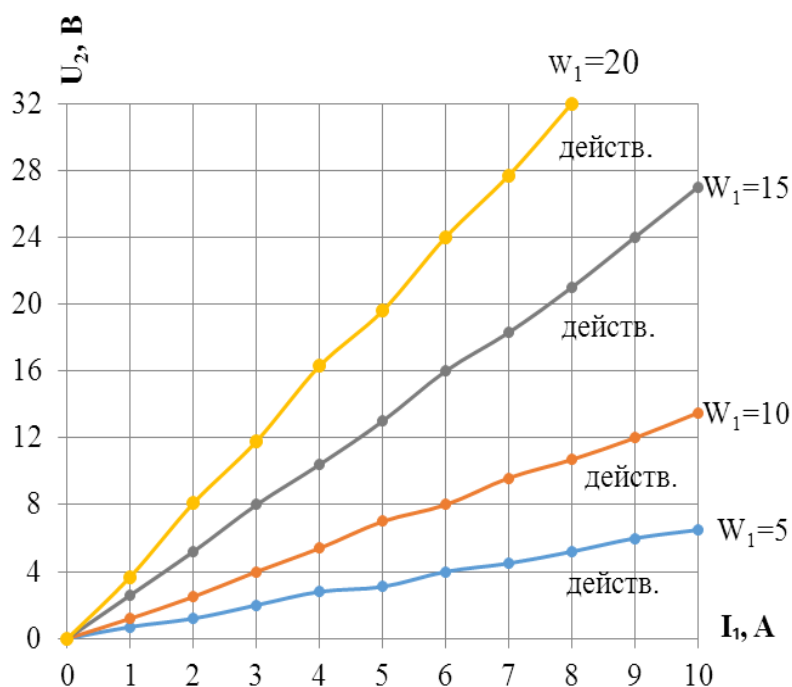


Fig. 10. Caracteristica exterioară a indicatorului reconstruit.

Dependența tensiunii secundare U_2 de curentul primar I_1 la un număr diferit de spire W_1 în înfășurarea primară.

Elaborată de autor.

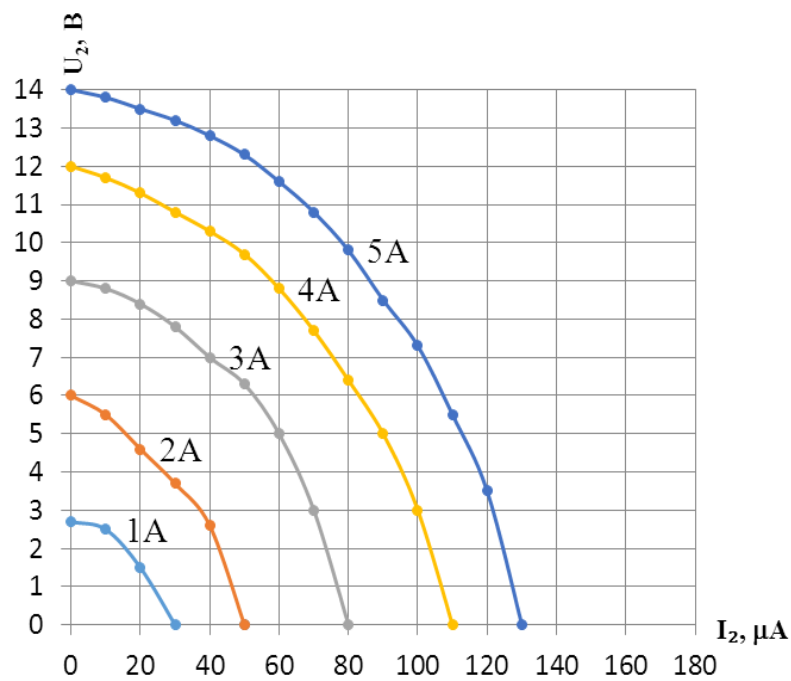


Fig. 11. Caracteristica exterioară a indicatorului reconstruit.

Dependența tensiunii secundare U_2 de curentul primar I_2 la valori diferite ale curentului I_1 în înfășurarea primară și la un număr diferit de spire la un număr diferit de spire $W=15$.

Elaborată de autor.

În conformitate cu sarcina propusă, a fost elaborată o schemă structurală tipică a unui dispozitiv de protecție universal.

Figura 12 prezintă schema dispozitivului de protecție propus (USU-1), care este compus din elemente structurale indicate. Circuitul este format din două canale: un canal de control al supraîncărcării curentului și un canal de control al ruperii de fază. În componența canalului de control al suprasolicitării motorului este format dintr-un indicator de curent (DT), primul element de prag (PR1), elementul de expunere în timp (BB), al doilea element de prag (PR3) și mecanismul de acționare a puterii (KM). În componența canalului de control a ruperii de fază a motorului intră:

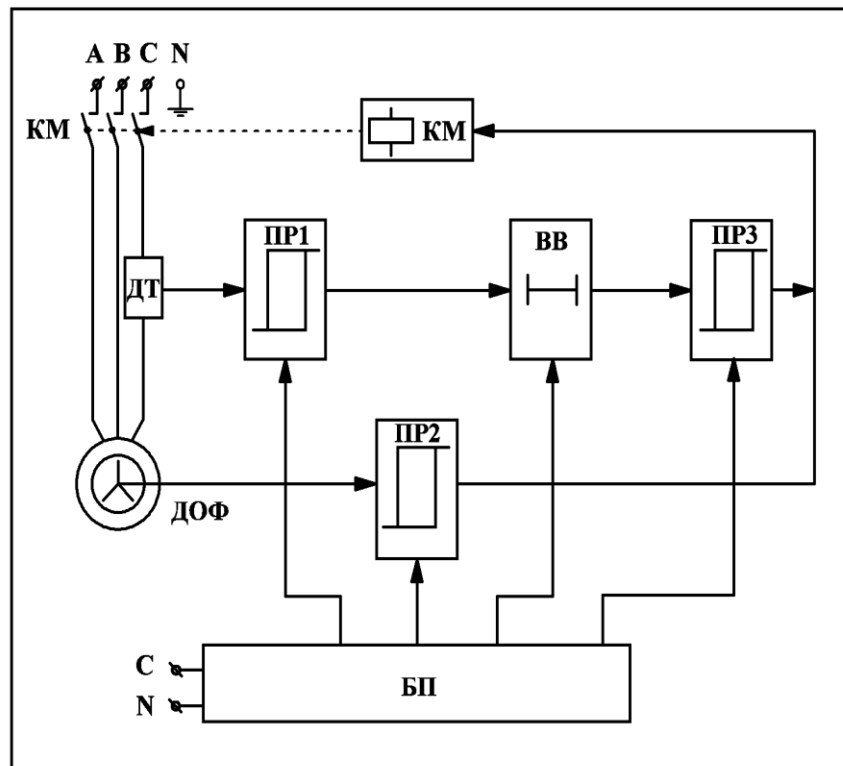


Fig. 12. Schema structurală a dispozitivului de protecție V3Y-1.
Elaborată de autor.

indicatorul ruperii fazelor (ДОФ), elementul de prag (ПП2) și mecanismul de acționare a circuitului de putere (KM). Comun pentru ambele canale este blocul de alimentare cu energie a elementelor de circuit electronic (PSU).

În lucrare se propune o soluție tehnică originală. Ca element de prag cu o valoare de prag reglată în dispozitivul de protecție, este propus un microcircuit comparativ de tip K554CA3. Elementul de comparație reprezintă un amplificator operațional care realizează funcția logică de a compara două tensiuni aplicate pe două intrări: directă și inversă.

Acest element dispune de o serie de avantaje semnificative în comparație cu alte elemente similare de prag (de exemplu, folosind un analog al elementului de comparație sau un element de prag bazat pe un tranzistor de joncțiune unică). În primul rând, elementul de prag pe baza comparatorului va permite de a schimba tensiunea aplicată la intrarea microcircuitului, și astfel reglând pragul la valoarea dorită. Având un coeficient de amplificare mare, elementul de comparație se caracterizează printr-o sensibilitate foarte înaltă, ceea ce asigură funcționarea microcircuitului atunci când diferența de nivel de tensiune la ambele intrări este de doar câteva zeci de milivolți. Un element de prag bazat pe elementul de comparație asigură legătura cu alte elemente logice (de exemplu, microcircuite din seria K155) fără dispozitive suplimentare pentru coordonare, ceea ce simplifică mult circuitul. În plus,

curentul de intrare al elementului de comparație nu depășește $2 \mu\text{A}$. Acesta e de cinci mii de ori mai mic decât curentul de intrare al elementului de prag construit, folosind tiristorul și o diodă stabilizatoare Zener (un astfel de circuit este utilizat într-un dispozitiv de protecție de tip $\Phi\text{Y3-M}$). De asemenea, trebuie reținut faptul că elementul de comparație are o stabilizare semnificativă a temperaturii elementelor constitutive ale microcircuitului. Astfel de avantaje lipsesc în circuitul elementelor de prag, pe un tranzistor de joncțiune aplicat în dispozitivul de protecție $\Phi\text{Y3-Y}$.

Funcționarea schemei structurale în regimul de control al suprasarcinii curentului.

Supraîncărcarea motorului este monitorizată de un traductor de curent primar (indicator de curent de curent). În calitate de convertor primar se utilizează indicatorul reconstruit al curentului de la stația de control a pompelor submersibile de tipul $\text{III}\Theta\text{T 5801-0362}\Gamma\text{-Y2}$. Înfășurarea primară a indicatorului de curent este conectată în serie la circuitul statoric al fazei motorului electric și asigură la ieșire o tensiune, a cărei valoare este direct proporțională cu valoarea curentului de sarcină al motorului electric. Tensiunea de la DT este furnizată la elementul redresor și mai departe până la elementul de prag PR1. Când pe una dintre intrările PR1 apare o tensiune mai mare sau egală cu cea indicată (tensiune de referință), PR1 se deschide și transmite un semnal spre elementul de expunere în timp BB. Elementul BB oferă o expunere în timp, a cărei valoare este invers proporțională cu valoarea semnalului. Când pe elementul BB se atinge valoarea semnalului egală cu tensiunea deschiderii elementului de prag PP3, ultimul se deschide și transmite un semnal către mecanismul de acționare a circuitului de putere KM care deconectează motorul de la rețea. În cazul unei supraîncărcări pe termen scurt, semnalul de la PR1 la BB se oprește înainte ca valoarea acestuia să crească la nivelul tensiunii la care se deschide cel de-al treilea element de prag al PR3 și deconectarea motorului nu se produce.

Funcționarea schemei structurale în regimul de control al ruperii de fază.

Controlul ruperii de fază a motorului electric e efectuat de convertizorul primar $\Delta\text{O}\Phi$, care utilizează sistemul „nul al motorului – nul al rețelei” (OO^0). Funcționarea circuitului are loc similar funcționării circuitului în cazul controlului supraîncărcării, cu singura diferență că semnalul regimului de avarie ajunge la elementul de prag PP2 nu de la indicatorul de curent DT, ci de la indicatorul de rupere a fazei $\Delta\text{O}\Phi$ și mai departe fără a utiliza elementul de expunere în timp (BB) la mecanismul de acționare a circuitului de putere KM.

În conformitate cu schema structurală prezentată, a fost elaborat un circuit electric principal și a fost efectuat un calcul al tuturor elementelor circuitului electric principal (Fig.14).

Dispozitivul universal de protecție propus (Y3Y-1) este realizat conform numărului A.C.nr. 1410175, A.C.nr.80.357435 și A.C.nr.87877691. Dispozitivul asigură protecția motorului împotriva principalelor regimuri de avarie (suprasarcină, rupere de fază, blocarea rotorului) a motoarelor electrice asincrone trifazate cu puterea de la 0,55 kW la 11,0 kW. Dispozitivul, după dimensiunile sale de gabarit, este executat astfel, încât să poată fi instalat în demarorul magnetic de fabrică în locul releelor termice.

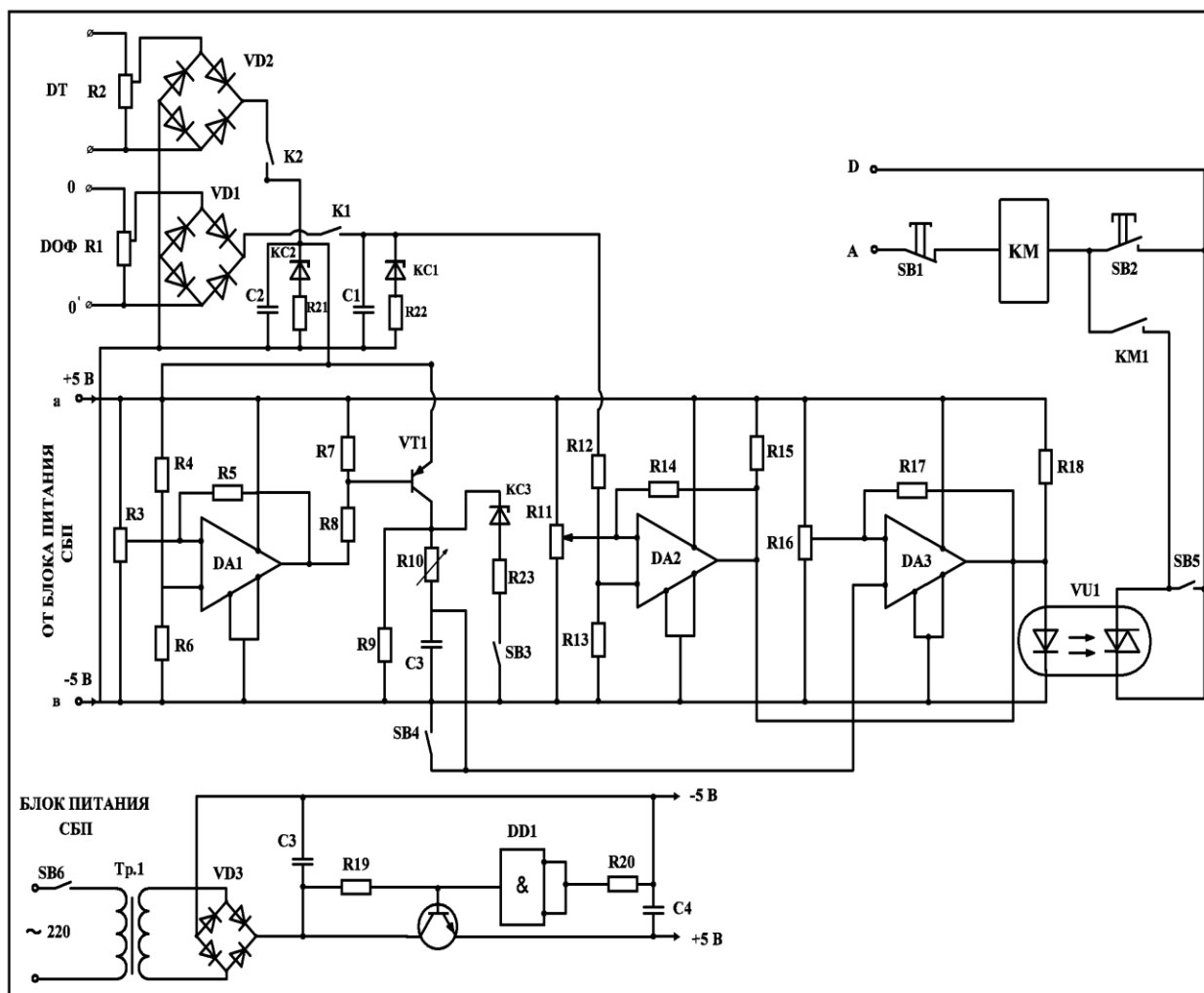


Fig. 14. Schema electrică principală a dispozitivului de protecție Y3Y-1.
Elaborată de autor.

Dispozitivul de protecție a trecut testele de producție la câteva ferme din Republica Moldova și a fost implementat la unele din întreprinderile de apărare ale Federației Ruse (Moskova, întreprinderile de apărare nr. 107078 și nr. 125833).

Efectul economic anual preconizat de la implementarea dispozitivului propus a fost determinat ca urmare a înlocuirii dispozitivelor tipice de protecție pentru ФУЗ, УВТЗ-1М și ПТЛ1021 (versiunea de bază) cu dispozitivul elaborat УЗУ-1 (versiunea propusă).

Determinarea costului pentru fabricarea dispozitivului de protecție propus se efectuează conform formulei pentru costurile anuale indicate (C_{ai}) conform formulei:

$$З_{пг} = C_r + E_n * K_r \quad (26)$$

unde: C_{ex} – costurile anuale de exploatare;

C_c - costuri capitale;

E_n – coeficientul normativ al investițiilor capitale în industria electrotehnică.

Determinarea eficienței economice anuale (E_a) se efectuează prin formula:

$$Э_r = ((C_{r1} + E_n * K_{r1}) + (C_{r2} + E_n * K_{r2})) - (C_{r4} + E_n * K_{r4}) \quad (27)$$

unde: C_{r1} – consumuri de exploatare pentru versiunea de bază (nr.1);

C_{r2} – consumuri de exploatare pentru versiunea de bază (nr.2);

C_{r4} – consumuri de exploatare pentru versiunea propusă (nr.4);

K_{r1} – costuri capitale pentru versiunea de bază (nr.1);

K_{r2} – costuri capitale pentru versiunea de bază (nr.2);

K_{r4} – costuri capitale pentru versiunea propusă (nr.4);

E_n – coeficientul normativ al investițiilor capitale din electrotehnică.

$$Э_r = (107,04 + 0,15 * 341,62) + (82,90 + 0,15 * 194,6) - (54,7 + 0,15 * 265,47) = 175,51 \text{ lei}$$

Perioada de rambursare a costurilor suplimentare (C_s) este determinată din condiția comparației versiunilor comparabile din punct de vedere tehnic. Și anume: utilizarea simultană a releelor termice ПТЛ1021 și ФУЗ (conform versiunii de bază) și a dispozitivului УЗУ-1 (versiunea propusă) conform formulei:

$$T_3 = \frac{K_{rп} - K_{rб}}{C_{rб} - C_{rп}} = \frac{265,47 - 242,22}{82,9 - 54,70} = 0,82 \text{ ani.} \quad (28)$$

unde: C_{cp} - costuri capitale pentru versiunea propusă;

C_{cb} - costuri capitale pentru versiunea de bază;

C_{cp} - costuri curente pentru versiunea propusă;

C_{cb} – costuri curente pentru varianta de bază.

III. CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

S-a stabilit că, chiar și într-un regim de alimentare absolut simetric, în timpul funcționării unui motor asincron trifazat din ultimele serii, între nodul nul al înfișurării statorului și nodul nul a rețelei este generată o tensiune a armonicii a treia cu o frecvență $f = 150 \text{ Hz}$ [9].

În această lucrare, este determinată natura apariției tensiunilor armonice superioare în conductorul nul al unui motor asincron trifazat; aceasta este saturația magnetică a conductorului magnetic al motorului [18]. Este propus modelul matematic specializat al unui motor asincron, care permite determinarea mărimii tensiunii acestor armonici în regimurile de funcționare și de avarie ale motorului [5,6,15].

Studiile experimentale au arătat că calculele efectuate utilizând modelul matematic elaborat care ia în considerație saturația sistemului magnetic al motoarelor moderne de inducție, sunt adecvate cu rezultatele studiilor experimentale cu o eroare relativă de cel mult 5-7% [7].

Studiile efectuate permit tragerea următoarelor concluzii:

1. S-a stabilit că parcul motoarelor electrice asincrone trifazate utilizate în agricultura Republicii Moldova (pe exemplul sectorului, creșterii animalelor) este format din motoare din seria AO, AO2, 4A, în principal, cu putere mică și medie (0,18–11,0 kW), care funcționează în zona producție cu condiții de mediu grele [14].
2. O revizuire a parcului motoarelor electrice asincrone a demonstrat că aproximativ 70% din defecțiunile lor le constituie regimurile de avarie, cum ar fi supraîncărcarea, blocarea rotorului și ruperea de fază a liniei de alimentare [1].
3. Teoretic s-a demonstrat că motoarele asincrone din ultimele serii 4A și 5A ar trebui considerate sisteme neliniare care generează în tensiunile de fază ale motorului armonici superioare [9].
4. S-a stabilit experimental că valoarea absolută a tensiunii armonice a treia este complet determinată de gradul de saturație a sistemului magnetic al unui motor electric asincron și depinde de următorii factori: tensiunea de rețea, alunecarea motorului, puterea motorului și numărul de perechi de poli ai motorului. Valoarea maximă a acestei tensiuni corespunde regimului mersului în gol al motoarelor electrice asincrone. Odată cu creșterea alunecării de la mersul în gol până la oprirea completă a rotorului, valoarea tensiunii indicate scade cu aproximativ 30-35%. Odată cu creșterea tensiunii de rețea, această tensiune crește, iar odată cu creșterea puterii motoarelor electrice asincrone și scăderea numărului de perechi de poli, tensiunea scade [13].
5. A fost investigat și reconstruit indicatorul de curent ca o sursă a semnalului de diagnostic pentru supraîncărcare de avarie a motoarelor electrice asincrone. S-au determinat parametrii optimi constructivi ai indicatorului reconstruit:

- numărul de spire ale înfășurării primare $W1 = 16$,
- numărul de spire ale înfășurării secundare $W2 = 800$;
- joc de aer al sistemului magnetic $\delta = 0,1 \text{ mm}$,
- rezistență optimă la sarcină a înfășurării secundare $R2 \geq 10,0 \text{ k}\Omega$ [16].

6. A fost elaborat un nou dispozitiv universal de protecție Y3Y-1 (conform A.C. nr. 1410175, nr. AC 807435 și nr.AC 877691) care asigură protecție împotriva suprasolicitării de avarie, ruperii de fază și blocării rotorului pentru motoare electrice asincrone trifazate cu o putere de la 0,55 kW la 11,0 kW. Dispozitivul elaborat a trecut testele de producție într-un șir de gospodării din Republica Moldova și a fost implementat la unele din întreprinderile de apărare din Rusia (Moskova, întreprinderile de apărare nr. 107078 și nr. 125833) [2,3,8,17,19].

7. Efectul economic al implementării acestui dispozitiv de protecție, este calculat în baza recomandărilor pentru determinarea eficienței economice pentru implementarea noilor tehnologii și constituie 175,51 lei, iar perioada de rambursare a costurilor suplimentare este de 0,82 ani.

Conform rezultatelor lucrărilor efectuate, se pot înainta câteva recomandări și propuneri practice:

- 1) Se propune utilizarea unor armonici superioare generate în conductorul nul al motoarelor asincrone moderne ca semnal de diagnosticare la elaborarea dispozitivelor de protecție în care în valitate de semnal al ruperii de fază se utilizează tensiunea dintre nodurile nule ale motorului și rețea [11,12].
- 2) Se recomandă utilizarea dispozitivului de protecție elaborat în locul releelor termice utilizate în prezent. În acest scop, dispozitivul după dimensiunile sale de gabarit este executat astfel, încât să fie montat în interiorul demaroarelor magnetice standard în loc de rele termice. În acest caz, dispozitivul protejează motorul nu numai de suprasarcină, ci și de ruperea de faze și blocarea rotorului și poate fi reglat la orice motor cu o putere de la 0,5 kW la 11,0 kW.

IV. LISTA PUBLICAȚIILOR PE TEMA TEZEI

1. ШАПОВАЛОВ, В.И., МИШИН, В.И. *Исследование эффективности работы электродвигателей в условиях сельского хозяйства Молдавии*. Отчет НИР, КПИ. Инв. №868508, № ГР 800059075. Кишинев: МолдНИИНТИ, 1980, 55с.
2. ШАПОВАЛОВ, В.И., МИШИН, В.И. и др. *Устройство для защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от перегрузки и обрыва фазы*. А.С. №807435. Б.И. №7 от 23.02.81.
3. ШАПОВАЛОВ, В.И., МИШИН, В.И. и др. *Устройство для защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от перегрузки и обрыва фазы*. А.С. №877691. Б.И. № 40 от 30.10.81.
4. ШАПОВАЛОВ, В.И., СОБОР, И.В., *Устройство для защиты асинхронных двигателей от аварийных перегрузок и обрыва фазы*. В кн. Ученые высшего учебного заведения Молдавии народному хозяйству. Кишинев: РИО МолдНИИНТИ, 1985. 2 с.
5. ШАПОВАЛОВ, В.И., СОБОР, И.В., МИШИН, В.И. *Математическая модель трёхфазного асинхронного двигателя для исследования аварийных режимов*. МНТК «Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов» Днепродзержинск: 1985, 2 с.
6. ШАПОВАЛОВ, В.И., СОБОР, И.В., МИШИН, В.И. *Математическая модель асинхронной машины*. Библиотечный указатель депонированных рукописей. Кишинев: МолдНИИНТИ, 1986. № I, 21с.
7. ШАПОВАЛОВ, В.И., СОБОР, И.В. *Некоторые результаты расчета магнитного состояния асинхронных двигателей*: тез. доклада XX НТК КПИ, Кишинев, 1986, 5 с.
8. ШАПОВАЛОВ, В.И., ЛЕВКО, А.Н., СОБОР, И.В. и др. *Устройство для защиты погружного электродвигателя от перегрузок, обрыва фазы и сухого хода*. А.С. № 1410175, 1987.
9. ШАПОВАЛОВ, В.И., ЛЕВКО, А.Н., СОБОР, И.В. *Гармоники насыщения асинхронных двигателей в динамических и аварийных режимах*. МНТК «Динамические режимы работы асинхронной машины», Каунас: 1988. 1 с.
10. ШАПОВАЛОВ, В.И., ЛЕВКО А.Н., СОБОР И.В. *Электронное устройство защиты асинхронных электродвигателей*: тезисы доклада НТК КПИ, Кишинев, 1989. 2 с.
11. ШАПОВАЛОВ, В.И., *Напряжение нулевой последовательности как диагностический сигнал в устройствах защиты электрических двигателей*. Сборник научных трудов ГАУМ, Кишинэу: 2000. 1с.
12. ШАПОВАЛОВ, В.И. *Некоторые результаты исследований параметров системы нуль сети 220/380 – нуль электродвигателя*. ВНИИ ЭСХ. Сборник научных трудов 5-й международной НТК, “Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве”, часть 1. Москва: 2006, 4 с.
13. ШАПОВАЛОВ, В.И., ВОЛКОНОВИЧ, Л.Ф. *Напряжение нулевой последовательности как диагностический сигнал обрыва фазы асинхронного электродвигателя*. ВНИИ ЭСХ. Сборник научных трудов 5-й международной НТК “Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве”, часть 1. Москва: 2006. 2с.

14. ШАПОВАЛОВ, В.И. *Краткий анализ парка асинхронных электродвигателей, применяемых в сельском хозяйстве РМ*. Сборник научных трудов 6-й международной НТК, часть 1. Кишинэу: ГАУМ, 2015, 2с.
15. ШАПОВАЛОВ, В.И. *Математическая модель асинхронного трехфазного электродвигателя в условиях насыщения магнитной системы*. Сборник научных трудов 6-й международной НТК, часть 1. Кишинэу: ГАУМ, 2015, 4с.
16. ШАПОВАЛОВ, В.И. ВОЛКОНОВИЧ, Л.Ф. *Исследования измерительного преобразователя тока*. Сборник научных трудов Академии Наук Молдовы. Институт энергетики. Международная конференция «Энергетика Молдовы-2016». часть III, 7с.
17. ШАПОВАЛОВ, В.И. *Универсальное защитное устройство*. Сборник научных трудов ГАУМ 46-й выпуск, часть 1. Кишинэу: 2018, 5с.
18. ШАПОВАЛОВ, В.И. Асинхронные двигатели современных серий как не линейные системы – источники напряжения высших гармоник в нулевом проводе. ГАУМ, “*Știința agricolă*”. Выпуск 2. Кишинэу: 2019, 9 с., УДК 621.515.3.
19. SHAPOVALOV, V. Universal protection device as an efficient way to increase the operational reliability of asynchronous engines. UTM, “*Journal of Engineering Science*”. Volum 26 (2), Chisinau: 2019, p.58-65, УДК 321.316.925(088.8).

ADNOTARE

la teza de doctor în științe tehnice cu tema: „**Perfecționarea dispozitivelor de protecție a motoarelor electrice asincrone trifazate utilizate în agricultură**”, Veaceslav Șapovalov, Chișinău, 2019.

Structura tezei include: introducere, trei capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 176 surse, 9 anexe, 120 pagini text de bază, 39 figuri, 68 tabele, rezultatele cercetării sunt publicate în 19 lucrări științifice.

Cuvinte cheie: protecția motoarelor asincrone, fiabilitatea funcționării motoarelor asincrone, modelul matematic al unui motor de inducție.

Scopul cercetării: constă în elaborarea unui dispozitiv universal pentru protecția motoarelor electrice asincrone trifazate de principalele regimuri de rezervă.

Obiectivele cercetării constau în elaborarea unei scheme structurale și conceptuale al dispozitivului de protecție pe baza cercetării efectuate și a modelului matematic propus.

Metodologia cercetării științifice include metodele de analiză, sinteză, modelare și metoda ipotetică utilizată.

Noutatea și originalitatea științifică constă în dezvăluirea esenței apariției tensiunilor armonice ridicate în cablul zero a unui motor asincron.

Problema științifică importantă soluționată în domeniul cercetat. Este obținută o justificare teoretică a prezenței în cablul zero a motorului asincron a unei tensiuni înalte armonice și sunt determinați factorii care influențează magnitudinea acestei tensiuni și limitele modificării sale.

Semnificația teoretică a cercetării constă în justificarea schemei structurale și a parametrilor necesari pentru toate tipurile de dispozitive de protecție, a căror funcționare se bazează pe apariția unei tensiuni în cablul zero în momentul întreruperii fazei de alimentare.

Valoarea aplicativă a lucrării constă în faptul că caracteristicile obținute pe cale experimentală ale unui motor asincron au servit drept bază pentru fundamentarea și elaborarea sarcinii de proiectare a unui dispozitiv de protecție universal, adică aducându-l la nivelul unei probleme de inginerie.

Implementarea rezultatelor științifice. Cercetările analitice și experimentale au fost utilizate la elaborarea dispozitivului universal de protecție, ale cărui mostre experimentale au fost implementate într-un de gospodării agricole din Republica Moldova (s. Volontirovca, r-ul Ștefan-Vodă, ferma avicolă) și din Rusia (or. Moskova, întreprinderile de apărare nr. 107078 și nr. 125833).

АННОТАЦИЯ

докторской диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук на тему;
"Усовершенствование устройств защиты трёхфазных асинхронных двигателей сельскохозяйственного применения", Вячеслав Шаповалов, Кишинев, 2019.

Структура диссертации состоит из: введения, трёх глав, общих выводов и рекомендаций, библиографии из 176 наименований, 9 приложений, 120 страниц основного текста, 39 рисунков, 68 таблиц. Полученные результаты были опубликованы в 19 научных работах.

Ключевые слова: защита асинхронных двигателей, надежность работы асинхронных двигателей, математическая модель асинхронного электродвигателя.

Цель исследования заключается в разработке универсального устройства защиты трехфазных асинхронных электродвигателей от основных аварийных режимов.

Задачи исследования заключаются в разработке структурной и принципиальной схемы защитного устройства на базе расчётов предложенной математической модели и выполненных исследований характеристик двигателей, работающих в аварийных режимах.

Методология научного исследования включает в себя использованные методы анализа, синтеза, моделирования и гипотетический метод

Научная новизна и оригинальность заключается в раскрытии сущности возникновения напряжения высших гармоник в нулевом проводе асинхронного двигателя и разработке специализированной математической модели асинхронного двигателя позволяющего определять напряжение высших гармоник в нулевом проводе.

Важная научная проблема, которая решена. Получено теоретическое обоснование наличия в нулевом проводе асинхронного двигателя напряжения высших гармоник, определены факторы, влияющие на величину этого напряжения и пределы его изменения.

Теоретическая значимость исследования состоит в обоснованности структурной схемы и необходимых параметров для всех видов защитных устройств, работа которых основана на появлении напряжения в нулевом проводе в момент обрыва питающей фазы.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что результаты исследования послужили основой для обоснования и разработки задания на проектирование универсального защитного устройства, то есть доведение его до уровня инженерной задачи.

Внедрение научных результатов. Опытные образцы защитного устройства были опробованы в ряде хозяйств Молдовы (район Штефан Водэ, с.Волонтировка, птицеферма) и внедрены в России (г.Москва, оборонные предприятия №107078 и №125833).

ANNOTATION

Doctoral thesis in technical sciences: „**Improvement of protection devices for three-phase asynchronous motors used for agricultural purposes**”, Veaceslav Sapovalov, Chisinau, 2019.

Thesis structure includes: the introduction, three chapters, general conclusions and recommendations, a bibliography of 176 sources, 9 annexes, 120 pages of the basic text, 39 figures and 68 tables, research results are published in 19 scientific papers.

Key words: protection of asynchronous motors, reliability of asynchronous motors, mathematical model of an induction motor.

The purpose of research: to develop a universal device for the protection of asynchronous three-phase electric motors according to the main reserve regimes.

The objectives of research: to develop a structural and conceptual scheme of the protective device based on the performed research and the proposed mathematical model.

The methodology of scientific research includes the methods of analysis, synthesis, modeling and hypothetical method used.

Scientific novelty and originality of the research consist in identifying the essence of the appearance of high harmonic voltage in the zero-phase cable of an asynchronous motor.

The important scientific problem solved in the researched field. It was reached a theoretical argumentation justifying the appearance of high harmonic voltage in the zero-phase cable of an asynchronous motor and there were determined the factors that influence the magnitude of this voltage and the limits of its change.

The scientific significance of research consists in justifying the structural scheme and the required parameters for all types of protection devices, the operation of which is based on the appearance of high harmonic voltage in the zero-phase cable when interrupting power supply.

The applicative value of research consists in the fact that the obtained experimental characteristics of an asynchronous motor have served as a basis for substantiating and developing concrete task for designing a universal protective device, i.e. bringing it to the level of an engineering problem.

The implementation of scientific results. Analytical and experimental researches were used to develop the universal protection device, the experimental samples of which were implemented in a range of agricultural farms from the Republic of Moldova (the poultry farm located in Volontirovca village, Stefan-Voda district) and Russia (defense enterprises nr. 107078 and nr. 125833 from Moscow)

ȘAPOVALOV VEACESLAV

**PERFEȚIONAREA DISPOZITIVELOR DE PROTECȚIE A
MOTOARELOR ELECTRICE ASINCRONE TRIFAZATE UTILIZATE IN
AGRICULTURĂ**

**SPECIALITATEA: 255.01 – TEHNOLOGII ȘI MIJLOACE TEHNICE
PENTRU AGRICULTURĂ ȘI DEZVOLTAREA RURALĂ**

Rezumatul tezei de doctor în științe tehnice

Aprobat spre tipar: 07.11.2019
Hârtie offset. Tipar digital.
Coli de tipar: 2.0

Formatul hârtiei A4
Tiraj 50 exemplare
Comanda nr. 33

Centrul Editorial UASM
Chișinău, str. Mircești, 42
Tel. 022-432-575