

**ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Ставицький Володимир Миколайович**

УДК 621.314.572:621.313.333:622.625.28

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КЕРОВАНОВОГО АСИНХРОННОГО  
ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ВЕНТИЛЬНО-ТРАНСФОРМАТОРНИМ  
ІНВЕРТОРОМ ДЛЯ ШАХТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА**

Спеціальність 05.09.03 - Електротехнічні комплекси і системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Донецьк - 2002

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Донецькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Донецьк

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент Маренич Костянтин Миколайович, Донецький національний технічний університет, завідувач кафедри “Гірнична електротехніка і автоматика”

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Садовой Олександр Валентинович, Дніпродзержинський державний технічний університет, завідувач кафедри “Електрообладнання промислових підприємств”

кандидат технічних наук, доцент Борисенко Володимир Пилипович, Донецький національний технічний університет, доцент кафедри “Електропривід і автоматизація промислових установок”

Провідна установа - Національний гірничий університет, кафедра “Електричний привід”, Міністерство освіти і науки України, м.Дніпропетровськ

Захист відбудеться «        » о 13.15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К11.052.02 у Донецькому національному технічному університеті за адресою: 83000, м. Донецьк, вул. Артема, 58, 1-й навчальний корпус, ауд.201.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ДонНТУ за адресою: Україна, 83000, м. Донецьк, вул.Артема, 58, 2-й навчальний корпус.

Автореферат розісланий «        »

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
К11.052.02, к.т.н., доц.

Ларін А.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Широкий клас технологічних об'єктів потребує при своїй роботі забезпечення можливості глибокого і тривалого регулювання механічних координат приводного електродвигуна. При цьому часто виникають технічні протиріччя сумісності параметрів джерела живлення і параметрів силових ланцюгів двигуна. Відповідно до цього виникає технічна задача розробки і дослідження системи вентильного приводу, що містить пристрій адаптації параметрів джерела і споживача. Вирішення такої задачі актуально, зокрема, для електропривода шахтних акумуляторних і контактних електровозів. Досвід їхньої експлуатації виявив ряд недоліків, що істотно знижують ефективність застосовуваного електропривода постійного струму. Насамперед, це низькі ресурс і надійність колекторного вузла, якірних і полюсних обмоток двигунів, підвищена трудомісткість їхнього обслуговування.

Розглянуті обставини обумовлюють необхідність пошуку альтернативних рішень в галузі створення засобів регульованого електропривода шахтних електровозів. Дуже привабливою представляється перспектива застосування як приводних - асинхронних короткозамкнених електродвигунів (АД), що відрізняються високими експлуатаційно-економічними показниками. Будучи оснащеним відповідним перетворювальним пристроєм, АД дозволяє вирішити задачу удосконалення приводу електровоза. Проте відомі схеми перетворювачів не забезпечують узгодження напруг акумуляторної батареї й асинхронного електродвигуна потужністю 20...50 кВт.

Питанням дослідження і розробки систем електропривода, альтернативних існуючим приводам постійного струму, присвячені роботи ряду провідних учених (А.С.Сандлер, І.І.Епштейн, В.О.Шубенко, А.Я.Бернштейн, М.З.Дуднік, Т.О.Глазєнко, Є.М.Плохов), а також установ СНД (технічні університети Москви, Петербурга, Донецька, Одеси, Дніпропетровська, Новочеркаська, Єкатеринбурга). Велика увага приділяється даному напрямку в зарубіжних країнах (Німеччина, Австрія, Франція, Польща, ПАР, Японія й ін.).

Все це свідчить про актуальність обґрунтування спеціальної схеми силового інвертора, що відрізняється можливістю узгодження напруг джерела живлення і приводного асинхронного двигуна, а також більш глибокого вивчення процесів у системі "автономний інвертор - асинхронний двигун" із метою наукового обґрунтування раціональних параметрів силового інвертора для керування асинхронним електроприводом стосовно до шахтного електровоза. Галузь використання отриманих результатів може знаходитися і серед високовольтних приводів, що потребують регулювання частоти обертання, для яких відсутні технічні засоби регулювання з боку високої напруги.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні дослідження дисертаційної роботи виконані в рамках наукового напрямку кафедри ГЕА ДонНТУ і були використані при виконанні науково-дослідної роботи № Н17-95 "Дослідження процесів і розробка принципів удосконалення автоматизованого електропривода гірничих машин на основі застосування тиристорних комутаторів".

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи - обґрунтування раціональних параметрів схеми, а також раціонального алгоритму керування спеціальним вентиляльно-трансформаторним перетворювачем для асинхронного електропривода шахтного електровоза. Для цього були вирішені такі задачі:

1. Розроблено математичну модель системи ВТІ-АД, що описує процеси в електроприводі при варіюванні параметрів схеми і керованих величин;
2. Досліджено взаємний вплив АД і ВТІ під час їхньої спільної роботи;
3. Обґрунтовано раціональні параметри схеми заміщення перетворювача, що працює в складі тягового приводу;
4. Обґрунтовано аналітичні співвідношення для визначення раціональних значень керованих величин, що забезпечують реалізацію необхідного закону керування електроприводом на основі системи ВТІ-АД у всьому діапазоні варіювання механічних координат приводу, обумовленому механічною характеристикою електровоза.

**Об'єктом дослідження** є процеси в асинхронному електроприводі з вентиляльно-трансформаторним інвертором.

**Предметом дослідження** є обґрунтування раціональних параметрів схеми і закону керування силовим перетворювальним пристроєм, що забезпечує узгодження напруг джерела живлення й асинхронного короткозамкненого двигуна потужністю 20...50 кВт.

**Методи досліджень.** Теоретичні дослідження базуються на узагальненій теорії електричних машин, матрично-топологічних методах аналізу електричних кіл, математичних методах теорії диференціальних рівнянь. Експериментальна перевірка адекватності результатів теоретичних досліджень виконана із застосуванням сучасних вимірювальних приладів, що задовольняють вимогам точності і відповідності їхніх динамічних характеристик характеристикам досліджуваних процесів, а також із використанням при аналізі результатів експериментальних досліджень апарата математичної статистики.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- розроблена математична модель електромеханічної системи “вентиляльно-трансформаторний інвертор - асинхронний двигун” (ВТІ-АД), що описує статичні процеси в системі, яка відрізняється від відомих урахуванням нелінійної взаємодії між ЕРС обертання і ЕРС джерела, обумовленою наявністю в схемі вентиляльних елементів;

- розроблена математична модель електромеханічної системи ВТІ-АД, що описує динамічні процеси в електроприводі при варіюванні параметрів схеми і системи керування електроприводом, яка відрізняється від відомих урахуванням провідності різноманітних вентилів, а також урахуванням специфічного трансформаторного зв'язку між джерелом напруги, двигуневим навантаженням і однофазними ланками, що інвертують;

- обґрунтовані аналітичні залежності, що визначають раціональні значення керованих величин у всьому діапазоні варіювання механічних координат, обумовленому механічною характеристикою приводу; що відрізняються від відомих урахуванням при їхньому обґрунтуванні характерних особливостей

схеми ВТІ і специфічних вимог до тягового приводу, оснащеного автономним джерелом живлення.

**Практичне значення отриманих результатів:**

- визначено раціональні параметри схеми ВТІ, що забезпечують узгодження напруги джерела живлення і напруги силових кіл асинхронного короткозамкненого двигуна, стосовно до приводу шахтного електровоза;
- визначено раціональні значення керованих величин, що забезпечують заданий діапазон варіювання механічних координат відповідно до механічної характеристики приводу шахтного електровоза;
- на основі синтезованих математичних моделей проаналізовано вплив параметрів схеми і керованих величин на процеси в електроприводі шахтного електровоза;

Результати досліджень використані ДонНТУ в ході виконання держбюджетної науково-дослідної роботи № Н17-95 “Дослідження процесів і розробка принципів удосконалювання автоматизованого електропривода гірничих машин на основі застосування тиристорних комутаторів” і в навчальному процесі в ході викладання курсів “Основи силової перетворювальної техніки і силове перетворювальне устаткування шахт”, “Автоматизований електропривод машин і установок шахт і рудників”.

**Апробація роботи.** Основні положення дисертаційної роботи докладені, обговорені й одержали схвалення на IV міжнародній науково-технічній конференції “Прогрессивные технологии машиностроения и современность” (Севастополь, 1997 р.), V міжнародній науково-технічній конференції “Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века” (Севастополь, 1998 р.), I Всеукраїнській науково-технічній конференції аспірантів і студентів “Автоматизація технологічних об'єктів і процесів. Пошук молодих” (Донецьк, 2001 р.), Науково-практичній конференції “Донбас - 2020: наука і техніка - виробництву” (Донецьк, 2002 р.) а також на засіданнях науково-технічних рад інститутів УкрНДІВЕ, Дондівпровуглемаш, ДП “Торезький електротехнічний завод”, ВАТ “Дружківський машинобудівний завод”, ВАТ “Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря”, семінарах кафедри “Гірнична електротехніка й автоматика” ДонНТУ, а також кафедри “Автоматизація електроенергетичних систем і електропривід” ПДТУ.

**Публікації.** По темі дисертації опубліковано 9 друкованих робіт і 1 на CD-диску, у тому числі 6 у спеціальних наукових виданнях України, 4 - матеріали міжнародних, всеукраїнських і регіональних конференцій.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, п'ятьох розділів і висновку. Зміст роботи викладено на 128 сторінках машинописного тексту, ілюстрованого 54 рисунками. Робота містить 13 таблиць, список використаної літератури з 104 найменувань на 10 сторінках і 14 додатків на 58 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**В вступі** обгрунтована актуальність теми, визначена мета роботи і задачі дослідження, показана наукова новизна і відзначено практичне значення отриманих результатів.

**У першому розділі** наведений аналіз особливостей, властивих приводу рудникового електровоза. Сформульовано актуальність задачі по удосконаленню електроприводів шахтних електровозів.

Виконано детальний огляд робіт у даній галузі, здійснених Л.Ю.Вейцманом, В.О.Барським, Г.Г.Півняком, Р.Вагнером та іншими вченими. Зроблено висновок про перспективність застосування як тягового асинхронного короткозамкненого двигуна (АД), що характеризується високими експлуатаційно-економічними показниками. Відзначено, що, оснащення електровоза однодвигуневим асинхронним приводом необхідної потужності з передачею тягового зусилля на обидві колісні пари дозволяє вирішити поставлену задачу.

Аналіз досліджень і розробок А.С.Сандлера, М.Х.Сітніка, І.І.Епштейна, В.О.Шубенка, Ю.М.Гусяцького підтвердив принципову можливість створення силового інвертора, спроможного здійснювати регулювання механічних координат АД в необхідному діапазоні. Відзначено, що умовам експлуатації тягового приводу відповідає схема вентильно-трансформаторного інвертора (рис.1).

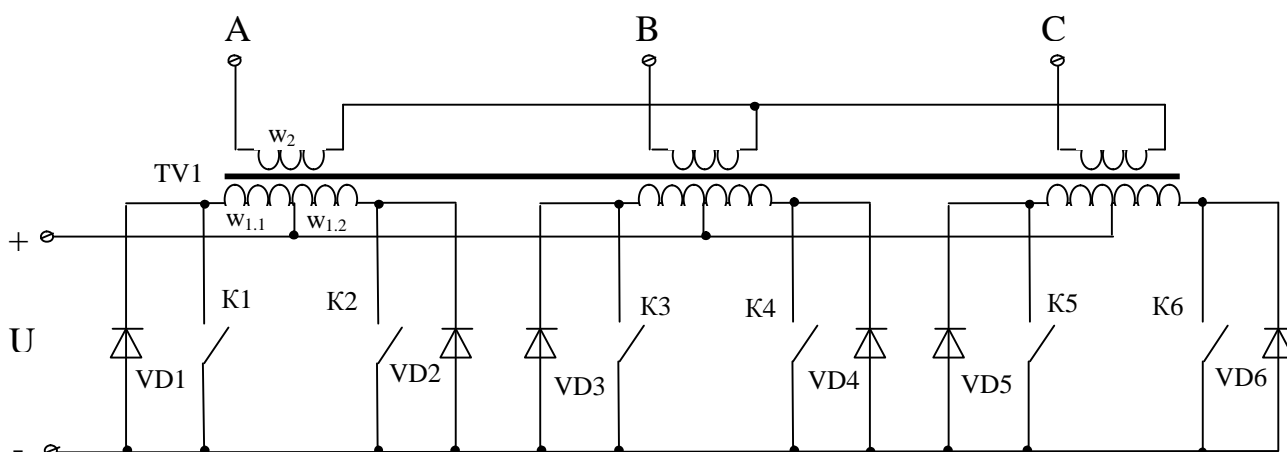


Рис.1. Принципова силова схема трифазного вентильно-трансформаторного інвертора

Дана схема дозволяє забезпечити узгодження величин напруг джерела постійного струму і силових кіл АД, забезпечує роботу приводу як у двигуневому, так і в генераторному режимах, задовольняє вимогам надійності, мінімальної кількості вентилів і може бути реалізована у вибухозахищеному виконанні. Сформульовані задачі дослідження.

**Другий розділ** присвячений теоретичним дослідженням процесів у системі ВТІ-АД. Аналіз проводився на основі кусково-припасувального методу з урахуванням припущень про миттєвий характер процесу комутації, а також ідеальних властивостей вентилів. Застосування матрично-топологічної методики дозволило формалізувати процес формування диференціальних рівнянь (ДР) і рівнянь зв'язку, для чого розрахункова схема системи ВТІ-АД (рис.2) була по-

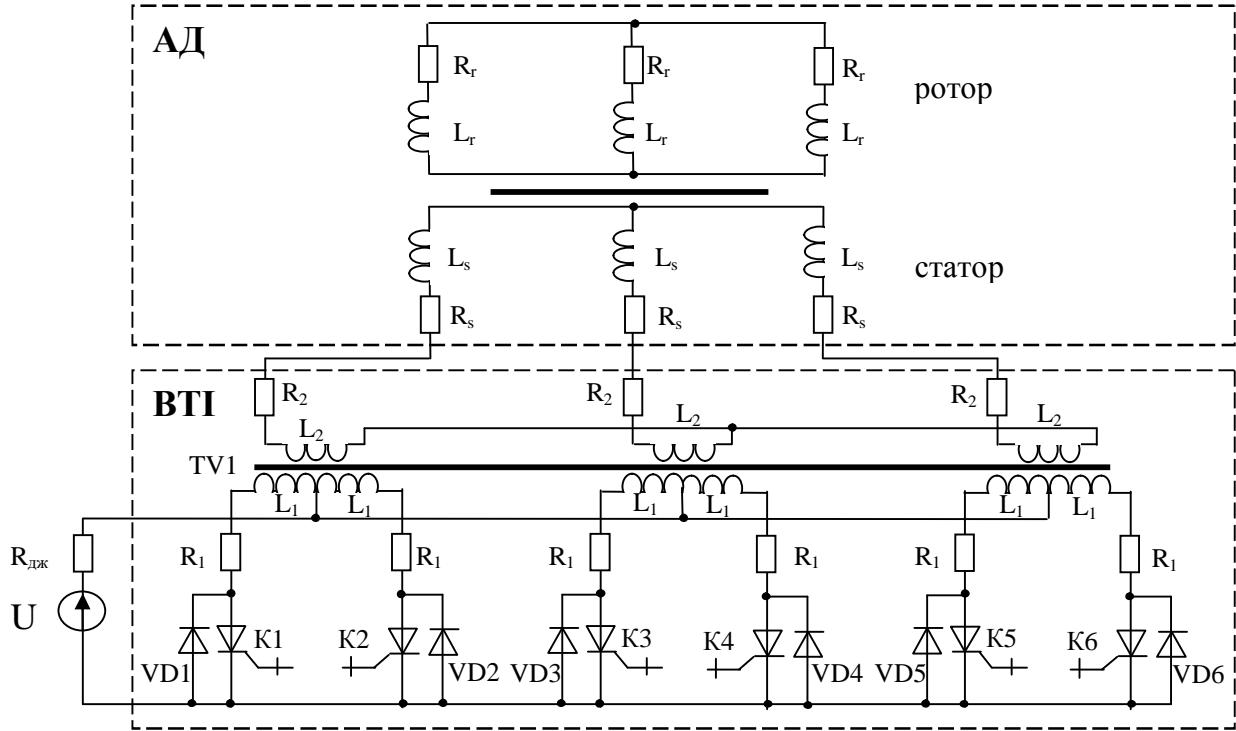


Рис.2. Розрахункова схема системи ВТІ-АД

дана у вигляді відповідного графа. На основі цього були сформовані масиви, що характеризують топологію й електричні параметри гілок схеми - матриці з'єднань  $P$ , головних контурів  $G$ , опорів  $R$  і індуктивностей  $L$ , а також вектори струмів  $I$ , потікозчеплень  $Y$  і ЕРС  $E$ . Відзначено, що з метою підвищення чисельної сталості рішення доцільно змінними стану прийняти потікозчеплення гілок схеми. Для зниження порядку отриманої системи автором запропонований метод незалежних потікозчеплень (МНП), що складається у визначенні необхідних параметрів на основі вектора незалежних змінних  $\Psi_H$ , що попередньо обчислюється. При цьому використовувані для формування рівнянь масиви  $M$  розділяються на незалежні  $M_H$ , залежні  $M_3$ , і змішані  $M_{3M}$  частини.

Система матричних рівнянь стану, складених на основі МНП з урахуванням перетворення Парка-Горева, має такий вигляд:

$$p\Psi_H'' = B'' \cdot \Gamma^t \cdot (E - (R'' + \omega_r \cdot L''_{o6}) \cdot \Gamma \cdot A'' \cdot \Psi_H''), \quad (1)$$

$$I'' = \Gamma \cdot A'' \cdot \Psi_H'', \quad (2)$$

$$L'' = S^t \cdot L \cdot S, \quad (3)$$

$$L''_{o6} = \frac{1}{\omega_r} \cdot S^t \cdot (pL \cdot S + L \cdot pS), \quad (4)$$

$$L''^{-1} = Y'' = \begin{bmatrix} Y_H'' & Y_{3M}'' \\ Y_{3M}''^t & Y_3'' \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$A'' = ([1]_H + L_H''^{-1} \cdot L_{3M}'' \cdot \Gamma_3)^{-1} \cdot L_H''^{-1}, \quad (6)$$

$$B'' = [1]_H + \Gamma_3^t \cdot K_3 \cdot Y_3''^{-1} \cdot (\Gamma_3 \cdot A'' - Y_{3M}''^t). \quad (7)$$

де  $S$  - матриця перетворення системи координат;

$\Psi_H''$ ,  $I''$  - перетворені вектори незалежних змінних і струмів;

$\mathbf{L}''$ ,  $\mathbf{Y}''$ ,  $\mathbf{L}_{об}''$ ,  $\mathbf{A}''$ ,  $\mathbf{B}''$  - перетворені матриці індуктивностей, зворотних індуктивностей, міжфазових індуктивностей, обумовлених обертанням ротора, і матриці зв'язку;

Процеси в системі при взаємному перетворенні електромагнітної і механічної енергії з урахуванням специфічного характеру навантаження приводу шахтного електровоза описуються наступним рівнянням руху:

$$p \omega_r = \frac{pol}{J} \cdot (M_e \pm \Sigma M_{оп}), \quad (8)$$

де

$$M_e = 0,866 \cdot pol \cdot M_{sr} \cdot \begin{vmatrix} i_7'' & i_8'' & i_{12}'' \\ 1 & 1 & 1 \\ i_9'' & i_{10}'' & i_{11}'' \end{vmatrix}, \quad (9)$$

$$\Sigma M_{оп} = \frac{1}{i} \cdot R_k \cdot m_l \cdot g \cdot (\delta \cdot \cos \alpha \pm \sin \alpha), \quad (10)$$

$$J = J_p + \frac{m_l \cdot R_k^2}{i^2}. \quad (11)$$

$M_e$ ,  $\Sigma M_{оп}$  - електромагнітний момент і сумарний момент сил опору, приведені до вала АД;

$J$ ,  $pol$  - момент інерції мас, що обертаються і число пар полюсів АД;

$\delta$  - коефіцієнт тертя котання;

$\alpha$  - ухил рельсового шляху.

$m_l$  - маса локомотива;

$R_k$  - радіус колісної пари;

$i$  - передатне число редуктора.

Рівняння (1), (8) описують процеси в електромеханічній системі ВТІ-АД на інтервалі часу, що відповідає поточній конфігурації схеми. Наявність вентилів зумовлює непостійну конфігурацію схеми і змінний розмір масивів у рівнянні (1). Отже, необхідно контролювати величини, що надають вплив на провідність вентилів - полярність анодної напруги і наявність сигналів керування. На основі цієї інформації модифікуються масиви в рівнянні (1).

Аналіз роботи ВТІ на інтервалах переключення вентилів свідчить про необхідність обчислення післякомутаційних величин на основі загального закону сталості потокозчеплень замкнених контурів, доповненого аналітичним виразом 1-го закону Кирхгофа. У матричній формі ця процедура виглядає наступним образом:

$$\mathbf{X}_{0+}'' = \begin{bmatrix} \Gamma_{0+}^t \cdot \mathbf{K}_{0+} \\ \mathbf{P}_{0+} \cdot \mathbf{L}_{0+}''^{-1} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \text{Sm}(\Gamma_{\max}^t \cdot \mathbf{K}_{\max} \cdot \mathbf{L}_{\max}'' \cdot \text{Cor}(\mathbf{L}_{0-}''^{-1} \cdot \mathbf{X}_{0-}'')) \\ [\mathbf{0}] \end{bmatrix}. \quad (12)$$

де  $\mathbf{G}_{\max}$ ,  $\mathbf{K}_{\max}$ ,  $\mathbf{L}_{\max}''$  - матриці контурів, зв'язку й індуктивностей, що відповідають максимальній конфігурації схеми;

$\mathbf{K}_{0+}$ ,  $\mathbf{P}_{0+}$ ,  $\mathbf{G}_{0+}$  - матриці зв'язку, з'єднань і контурів, що відповідають післякомутаційній конфігурації схеми;

$\mathbf{L}_{0-}''$ ,  $\mathbf{L}_{0+}''$ ,  $\mathbf{X}_{0-}''$ ,  $\mathbf{X}_{0+}''$  - модифіковані матриці індуктивностей і комбіновані



вектори змінних стану, що відповідають конфігураціям схеми до і після комутації;

$S_m$ ,  $K_{or}$  - оператори виділення необхідної частини масиву і приведення масиву до єдиної розмірності.

Сумісне використання процедур визначення стану системи, модифікації масивів параметрів схеми, корекції післякомутаційного вектора змінних стану, а також розв'язання ДР дозволяє одержати послідовність моделювання динамічних процесів у системі ВТІ-АД.

Розроблена модель дозволяє досліджувати вплив на процеси в системі параметрів перетворювача і АД, а також зовнішніх факторів, обумовлених специфікою роботи приводу електровоза (рис.3). Моделюючий алгоритм (рис.4)

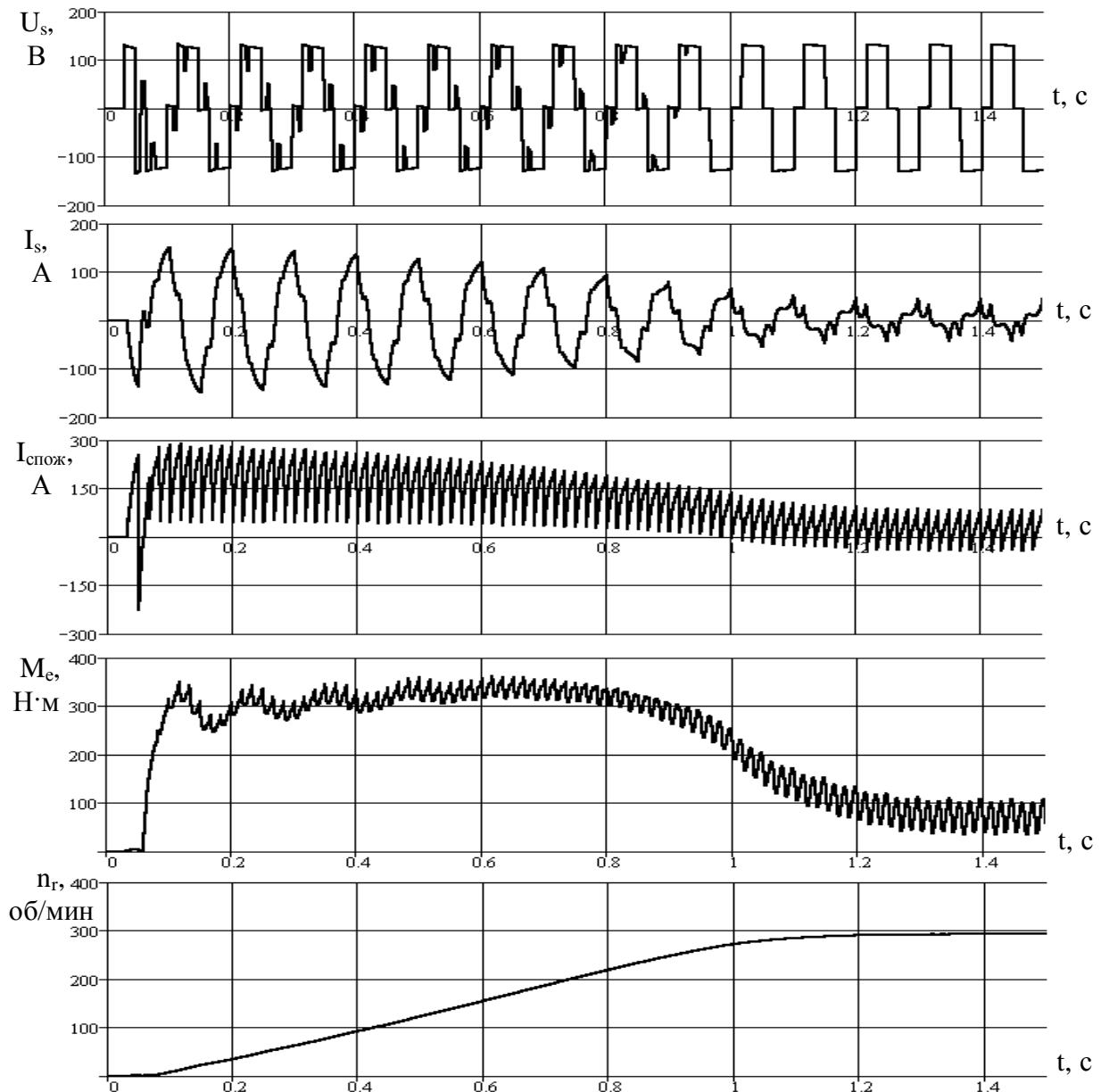


Рис.3. Моделювання процесів у системі ВТІ-АД під час пуску двигуна на зниженій частоті при детермінованій подачі напруги, що забезпечує сприятливі початкові електромагнітні умови ( $f=10$  Гц,  $\beta =70$  ел. гр.) ( $U_s$  - фазна напруга АД;  $I_s$  - фазний струм статора АД;  $I_{\text{спож}}$  - струм, що споживається ВТІ;  $M_e$  - електромагнітний момент АД;  $n_r$  - частота обертання ротора АД)

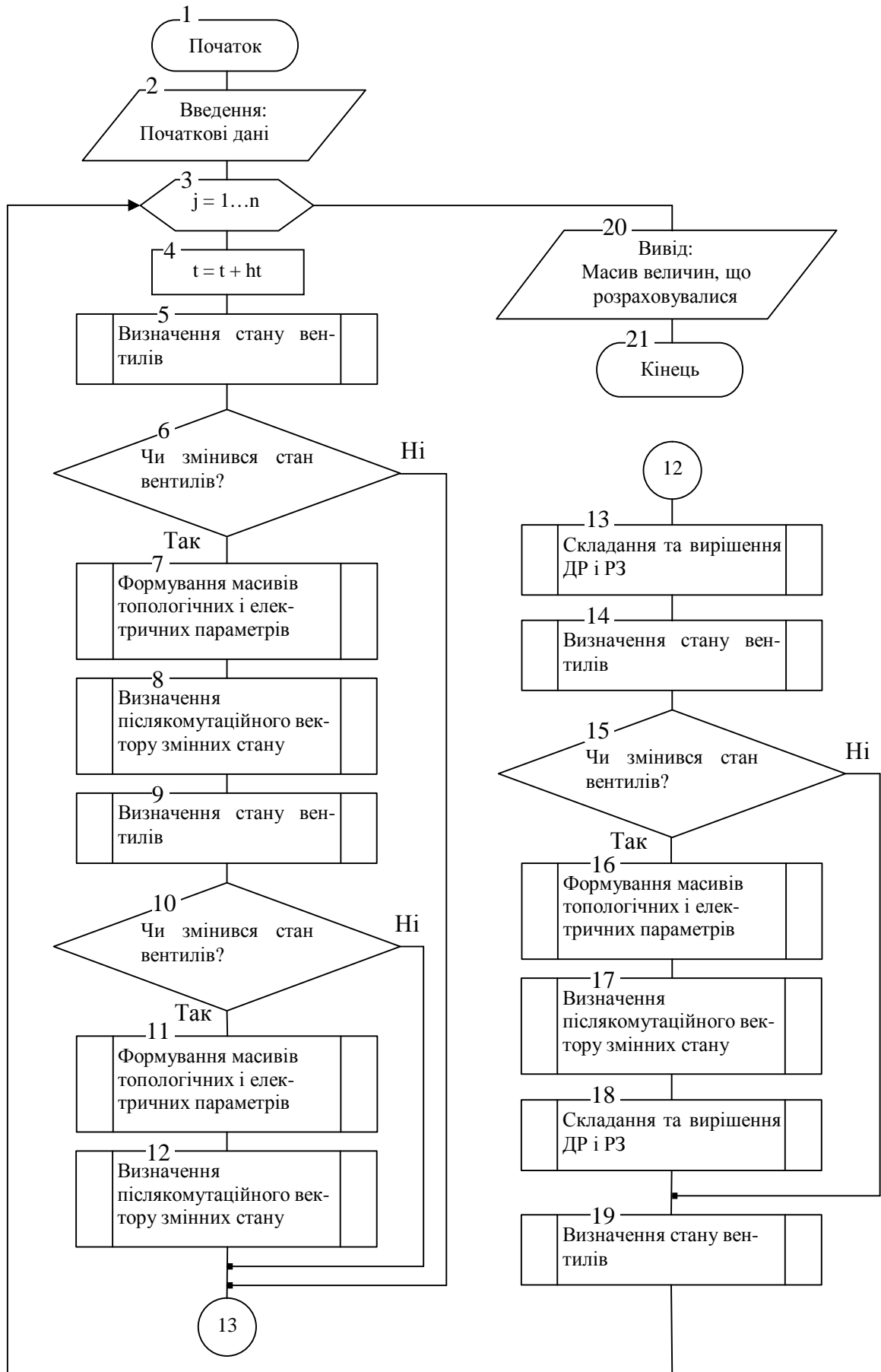


Рис.4. Блок-схема алгоритму моделювання динамічних процесів в системі ВТІ-АД

реалізований у вигляді комп'ютерної моделі за допомогою програмних засобів системи математичних розрахунків MathCAD.

У ході аналізу отриманих результатів був зроблений висновок про вплив ЕРС обертання АД на характер сталих процесів. Для визначення параметрів струмів і напруг доцільно перетворити розроблену динамічну модель до статичної форми.

Перехід до комплексних величин дозволив одержати систему рівнянь (13), що описує сталі електромагнітні процеси в досліджуваній схемі, і відповідну їй схему заміщення (рис.5):

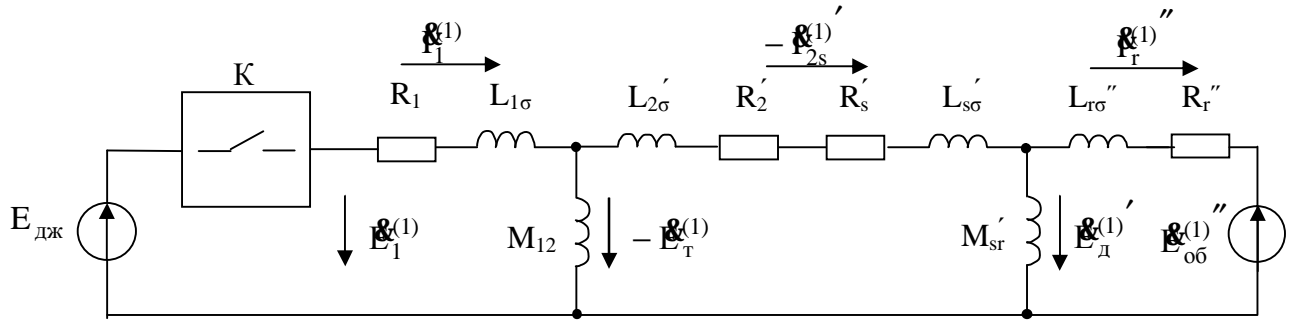


Рис.5. Схема заміщення системи ВТІ-АД в статичному режимі

$$\begin{cases} \dot{E}_1^{(1)} = R_1 \cdot \dot{I}_1^{(1)} + j \cdot X_1 \cdot \dot{I}_1^{(1)} - \dot{E}_T^{(1)}, \\ 0 = (R_2 + R_s) \cdot \dot{I}_{2s}^{(1)} + j \cdot (X_2 + X_s) \cdot \dot{I}_{2s}^{(1)} - \dot{E}_T^{(1)} - \dot{E}_d^{(1)}, \\ 0 = R_r \cdot \dot{I}_r^{(1)} + j \cdot X_r \cdot \dot{I}_r^{(1)} - \dot{E}_d^{(1)} - \dot{E}_{об}^{(1)} \end{cases} \quad (13)$$

де  $\dot{I}_1^{(1)}$ ,  $\dot{I}_{2s}^{(1)}$ ,  $\dot{I}_r^{(1)}$  - комплексні вектори основних гармонік струмів первинної обмотки трансформатора, статора і ротора;

$\dot{E}_T^{(1)}$ ,  $\dot{E}_d^{(1)}$ ,  $\dot{E}_{об}^{(1)}$  - комплексні вектори основних гармонік трансформаторних ЕРС трансформатора і АД, а також ЕРС обертання АД;

При розв'язанні системи (13) встановлено, що ЕРС обертання, яка спричиняє значний вплив на сталі процеси, характеризується практично синусоїдальною формою, незважаючи на несинусоїдальний характер напруги інвертора. Амплітуда і фаза основної гармоніки ЕРС обертання можуть бути визначені на основі співвідношень (14) - (15):

$$E_{об}^{(1)} = \frac{\omega_1 M_{12} M_{sr} R_r E_{1m}^{(1)}}{L_1 L_r (\sigma_r L_2 + \sigma_d L_s) \sqrt{\{\text{Re}(p_1)^2 + [\omega^{(1)} - \text{Im}(p_1)]^2\} \{\text{Re}(p_2)^2 + [\omega^{(1)} - \text{Im}(p_2)]^2\}}}, \quad (14)$$

$$\psi_{об}^{(1)} = \psi_1^{(1)} + \frac{\pi}{2} - \arg[\text{Re}(p_1) - j[\omega^{(1)} - \text{Im}(p_1)]] - \arg[\text{Re}(p_2) - j[\omega^{(1)} - \text{Im}(p_2)]]. \quad (15)$$

де  $E_{1m}^{(1)}$ ,  $\psi_1^{(1)}$  - амплітуда і фаза основної гармоніки напруги первинної обмотки трансформатора;

$\sigma_r$ ,  $\sigma_d$  - повні коефіцієнти розсіювання трансформатора і АД;

$p_1$ ,  $p_2$  - корені характеристичного рівняння системи (13).

Аналіз системи рівнянь (13) і її рішень дозволив виявити основні фактори, що визначають кількісні співвідношення і якісні показники сталих процесів у системі ВТІ-АД:

- момент опору ( $M_{оп}$ ) на валу АД, що зумовлює в статичному режимі частоту обертання ротора ( $\omega_r$ );

$$M = \frac{1,5pE_{1m}^{(1)}M_{12}^2M_{sr}^2R_r(\omega - \omega_r)}{L_1^2L_r^2(\sigma_T L_2 + \sigma_d L_s)\{\text{Re}(p_1)^2 + [\omega - \text{Im}(p_1)]^2\}\{\text{Re}(p_1)^2 + [\omega - \text{Im}(p_1)]^2\}}. \quad (16)$$

- інтервал провідності вентилів ( $\beta$ ), що визначає діюче значення основної гармоніки напруги інвертора при фазовому керуванні;

- взаємодія ЕРС джерела і ЕРС обертання, нелінійний характер якої зумовлений наявністю в схемі діодів VD1, VD2, що обмежують амплітуду імпульсів вихідної напруги інвертора (рис.6).

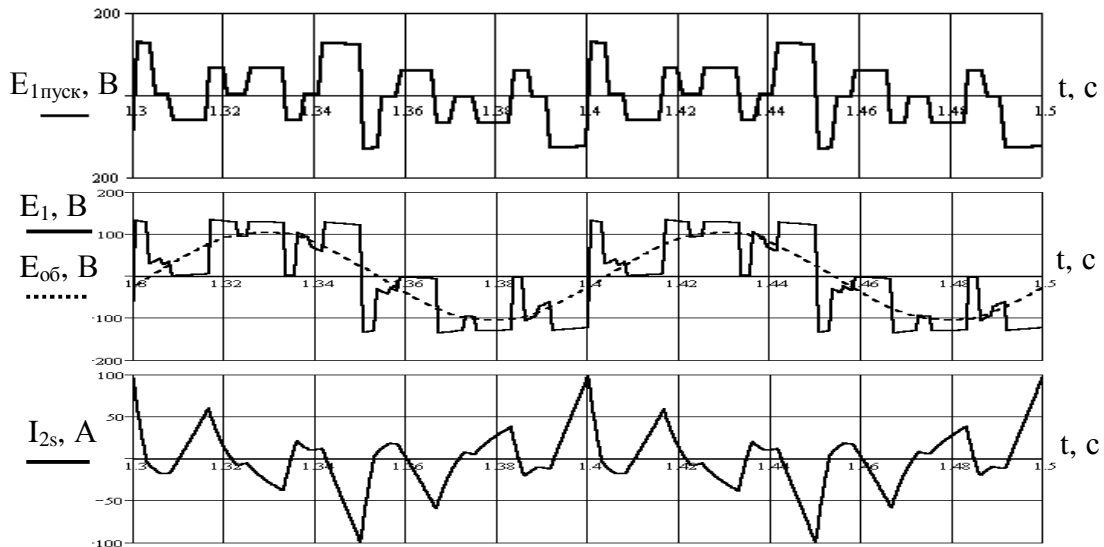


Рис.6. Вплив ЕРС обертання на напруги і струми в системі ВТІ-АД ( $f=10$  Гц,  $\beta=30$  ел.гр.) ( $E_{1\text{пуск}}$ ,  $E_1$  – ЕРС первинної обмотки трансформатора під час роботи АД з ротором, що загальмований та обертається,  $E_{об}$  – ЕРС обертання)

Спільна дія даних факторів однозначно визначає модулі й орієнтацію векторів струмів і напруг. У результаті отримані математичний опис і складена комп'ютерна модель, що дозволяє визначити сталі значення напруг у системі (рис.7).

**Третій розділ** присвячений обґрунтуванню раціональних параметрів досліджуваної системи стосовно до приводу шахтного електровоза. Розроблена динамічна модель була використана разом із методами теорії планування експерименту (ТПЕ) для визначення раціональних параметрів схеми заміщення перетворювача. У якості базового режиму під час розрахунку параметрів схеми інвертора був прийнятий короткочасний (S2) тривалістю 60 хв. Основний критерій - забезпечення відповідності механічних координат приводу умовам годинного режиму ( $F_r$ ,  $v_r$ ). Додатковою умовою є мінімум струму, споживаного системою, і фіксоване значення робочого магнітного потоку. Використання методів ТПЕ дозволяє найбільш швидко й ефективно досягти поставленої мети, базуючись на результатах обмеженої кількості експериментів, що проводяться за допомогою розробленої моделі. Аналіз функціональних залежностей  $\omega_r(L_1, L_2, f, \beta)$ ,  $I_1(L_1, L_2, f, \beta)$ ,  $\Psi(L_1, L_2, f, \beta)$ , що були отримані за допомогою оп-

тимізуючих засобів пакета MathCAD дозволив визначити для однодвигунного асинхронного приводу потужністю 23 кВт, що відповідає сумарній потужності базового приводу постійного струму електровоза АМ-8д, раціональні параметри схеми заміщення ВТІ (індуктивності обмоток трансформатора -  $L_1, L_2$ ), а також прийнятні значення керованих величин для годинного режиму (частота -  $f$  і кут провідності -  $\beta$  при фазовому регулюванні вихідної напруги):  $L_1 = 0,0127$  Гн;  $L_2 = 0,2354$  Гн;  $f = 47,7$  Гц;  $\beta = 61,7$  ел.гр.

Режим роботи приводу характеризується широким діапазоном варіюван-

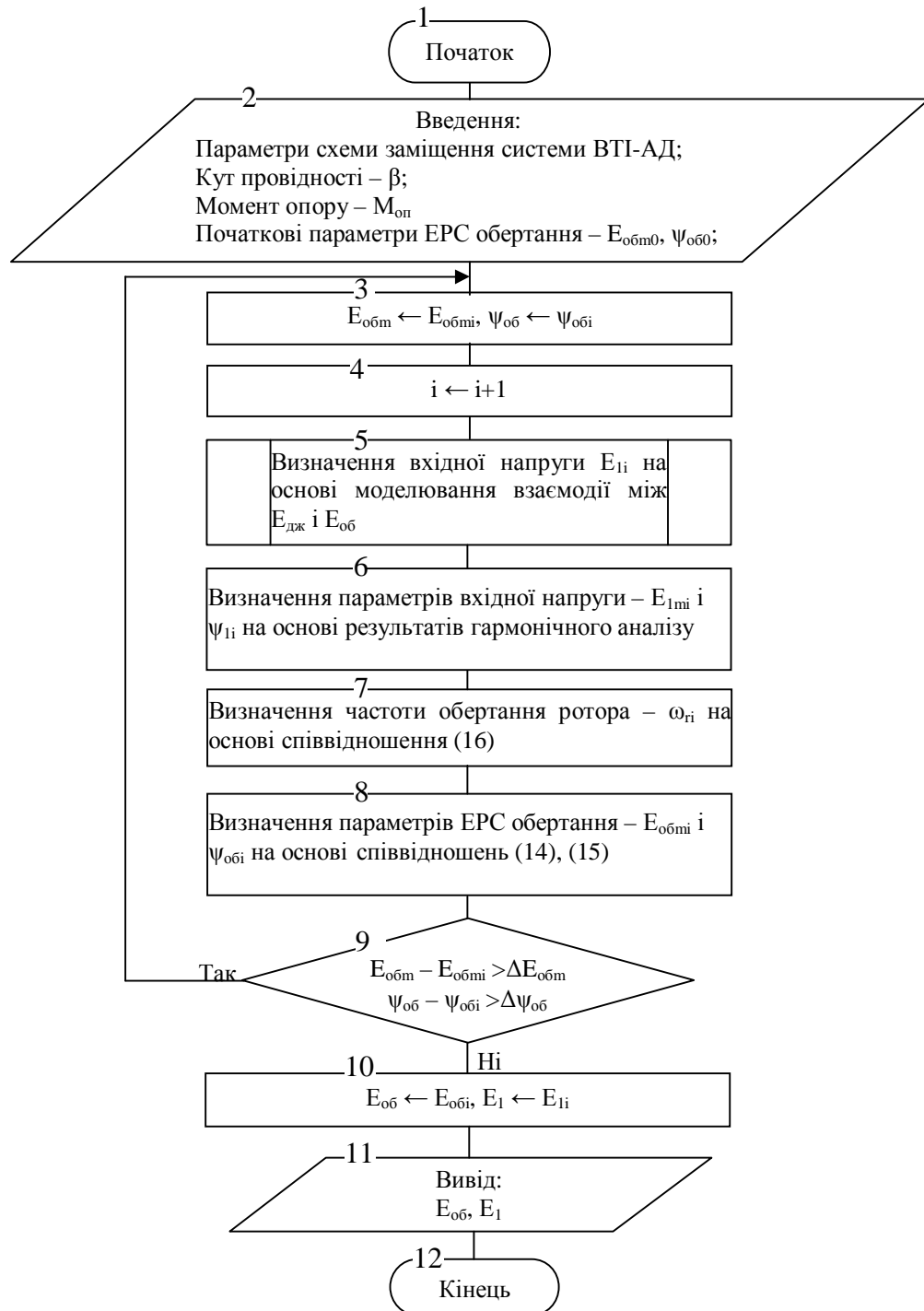


Рис.7. Блок-схема алгоритму моделювання ЕРС обертання і напруги на вході ВТІ в сталому режимі.

ня механічних координат. Необхідна форма механічної характеристики забезпечується за рахунок регулювання частоти і діючого значення напруги на двигуні в разі зміни навантаження на валу, у результаті чого формується сімейство штучних механічних характеристик АД. Наявність ВТІ зумовлює необхідність обґрунтування раціональних співвідношень керованих величин для кожної з точок заданої механічної характеристики приводу електровоза. Зазначеними параметрами є частота  $f$  сигналів керування вентилями, а також кут провідності  $\beta$ , що визначає діюче значення напруги при фазовому керуванні. Умовою оптимізації є мінімум споживаного струму, а також забезпечення необхідних механічних координат приводу в кожній із точок заданої механічної характеристики й обмеження величини робочого магнітного потоку.

Дана задача була вирішена у відношенні механічної характеристики приводу електровоза АМ-8д шляхом сумісного застосування методів ТПЕ і лінійного програмування (ЛП). Використання ТПЕ дозволило одержати функціональні залежності характеристик, що оптимізуються, від параметрів оптимізації в деякій області їхнього варіювання. Оптимальні співвідношення зазначених величин визначені під час вирішення задачі оптимізації цільової функції методами ЛП. У результаті отримані вектори взаємозалежних величин - частоти  $f$ , куту провідності  $\beta$ , моменту  $M$ , частоти обертання  $\omega_r$ , струму  $I_1$ , потокозчеплення  $\Psi$ . У результаті апроксимації дискретних даних отримані аналітичні функції (17) - (18):

$$f(M) = 44,72 + \frac{3144}{M} \quad (17)$$

$$\beta(f) = 62,3 + 30,7 \cdot e^{-\frac{f-50,9}{2,69}} \quad (18)$$

У четвертому розділі наведені результати перевірки адекватності розроблених теоретичних положень, а також результати експериментальних досліджень макетного зразка приводу. Потужність приводного АД складає 11 кВт. Регулювання навантаження приводного двигуна здійснювалося машиною постійного струму з незалежним збудженням, що працює в режимі динамічного гальмування.

Перший етап експериментальних досліджень присвячений установленню коректності розробленої математичної моделі електромеханічної системи ВТІ-АД шляхом аналізу осцилограм електромагнітних процесів. Зіставлення осцилограм реальних процесів у приводі із результатами моделювання дозволяє зробити висновок про їх якісну і кількісну відповідність - величина відносного відхилення кількісних показників не перевищує 6,7%.

Експериментально підтверджені теоретичні висновки про вплив ЕРС обертання на процеси в системі ВТІ-АД. Аналіз осцилограм струмів і напруг інвертора свідчить про відповідність реальних і теоретично обчислених параметрів ЕРС обертання і напруги первинної обмотки трансформатора ВТІ (відносне відхилення не перевищує 7,5%). Осцилографування процесів у системі із двигуном, що загальмований та обертається, підтвердило справедливність висновків про нелінійну взаємодію ЕРС обертання і ЕРС джерела, що виражається в об-

меженні амплітуди імпульсів вихідної напруги на рівні ЕРС джерела і пояснюється наявністю діодів зверненого струму в схемі ВТІ.

Оцінка коректності теоретично обґрунтованих співвідношень керованих величин проводилася шляхом побудови експериментальних залежностей  $\omega_r^* = f(M^*)$ ,  $\omega_r^* = f(I_1^*)$  і їхнього порівняння із заданими. З цією метою були проведені експериментальні дослідження системи ВТІ-АД з параметрами керування, обумовленими співвідношеннями (17) - (18), і відповідному варіюванні навантаження на валу приводного двигуна (регулювання моменту опору здійснювалося за рахунок керування збудженням навантажувального генератора). Результуюча характеристика являє собою геометричне місце точок перетинання сімейства штучних характеристик АД з відповідними характеристиками навантажувального моменту (рис.8.а). Аналіз результатів показав, що відхилення експериментальної характеристики від заданої не перевищує 16%.

На основі результатів вимірювання струму, споживаного приводом при різноманітних рівнях механічного навантаження, побудована електромеханічна характеристика системи ВТІ-АД  $\omega_r^* = f(I_1^*)$  (рис.8.б). Її зіставлення з аналогічною характеристикою базового приводу свідчить про наявність відхилення, що не перевищує 18,1%.

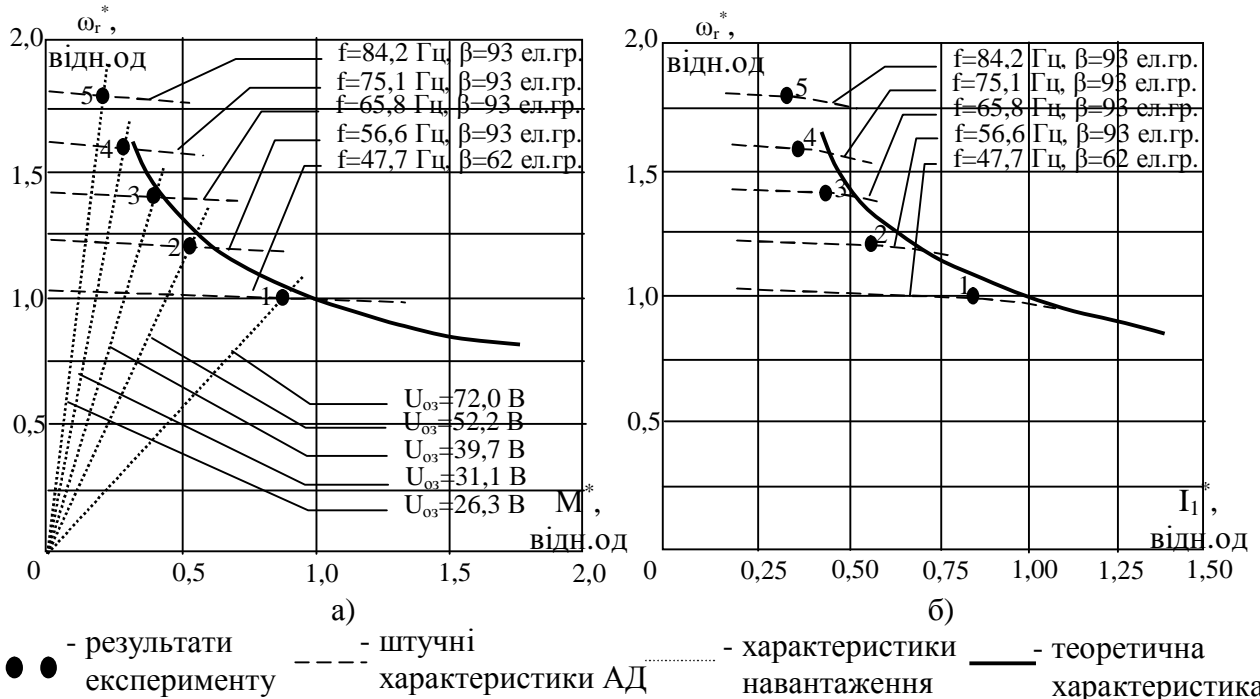


Рис.8. Теоретичні та експериментальні характеристики приводу.

**П'ятий розділ** містить опис технічних рішень, спрямованих на реалізацію результатів дисертаційної роботи в приводі шахтного електровоза і забезпечують виконання наступних функцій:

- автоматична підтримка частоти обертання приводного двигуна на рівні, зумовленому заданою механічною характеристикою приводу електровоза і необхідним значенням тягового зусилля;
- оперативне регулювання швидкості руху електровоза при постійному тяговому зусиллі шляхом перевода режиму роботи приводу на нову

характеристику;

- захист джерела живлення від пульсацій споживаного струму;
- контроль стану приводу і його захист у випадку аварійної ситуації.

Виходячи з цього, функціональна схема приводу шахтного електровоза буде мати таку конфігурацію (рис.9). Наведені в п'ятому розділі технічні

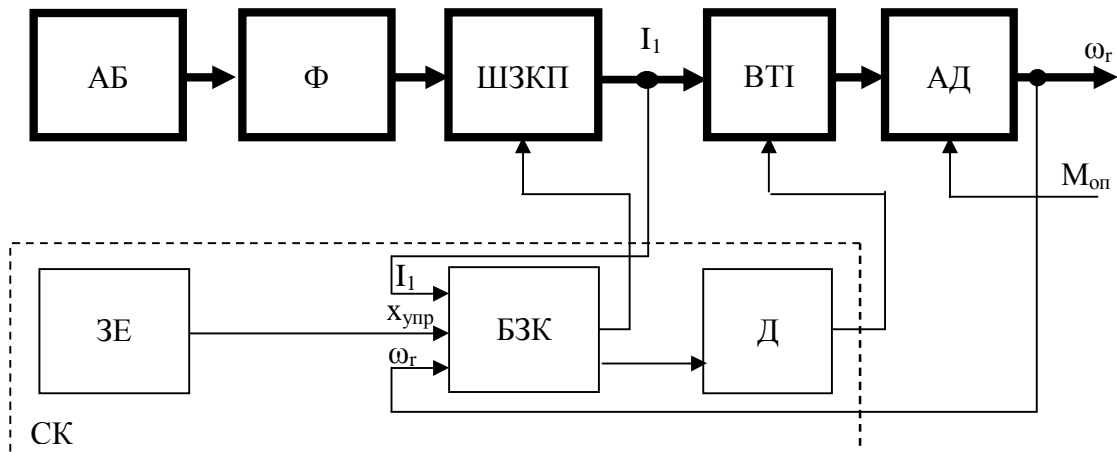


Рис.9. Функціональна схема асинхронного тягового приводу (АБ – акумуляторна батарея, Ф – фільтр, ШЗКП – швидкодіючий захисний комутаційний пристрій, ВТІ – вентильно-трансформаторний інвертор, АД – асинхронний двигун, СК – система керування, БЗК – блок захисту та керування, ЗЕ – елемент, що задає, Д – драйвери силових вентилів)

рішення дозволяють реалізувати пристрій керування приводом (БЗК) на базі однокристального мікроконтролера типу AT90S4433. В основу алгоритму програмного забезпечення покладені математичні залежності (17) - (18), що визначають раціональні співвідношення між керованими величинами приводу.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО ДИСЕРТАЦІЇ

У дисертаційній роботі на основі результатів математичного моделювання процесів у системі ВТІ-АД вирішена актуальна науково-технічна задача, що полягає у виборі схеми й обґрунтуванні раціональних параметрів спеціального силового перетворювача для керування асинхронним електроприводом щодо шахтного електровоза.

Основні наукові і практичні результати роботи:

1. На основі аналізу умов експлуатації приводу підземних локомотивів, а також критичного аналізу існуючих силових перетворювальних пристроїв для регульованого приводу змінного струму обґрунтована схема вентильно-трансформаторного інвертора для однодвигунного асинхронного електропривода шахтного електровоза. Запропонована схема дозволяє забезпечити узгодження величин напруг джерела постійного струму і силових ланцюгів АД, забезпечує роботу приводу як у двигуневому, так і в генераторному режимах, а також задовольняє вимогам надійності, мінімальної кількості вентилів і може бути реалізована у вибухозахищеному виконанні.

2. На основі кусково-припасувального методу і матрично-топологічної



методики розроблена математична модель динамічних процесів в електромеханічній системі ВТІ-АД, що відрізняється від відомих урахуванням характерних станів схеми, обумовлених провідністю різноманітних вентилів, а також урахуванням специфічного трансформаторного зв'язку між джерелом напруги, двигуневим навантаженням і однофазними ланками, що інвертують.

3. Дослідження електромеханічної системи ВТІ-АД дозволили встановити, що значний вплив на процеси в ній надає ЕРС обертання АД. Встановлено, що під її впливом змінюється форма напруги на вході ВТІ, що у свою чергу відбивається на параметрах самої ЕРС обертання. На величину і орієнтацію вектора  $E_{06}^{(1)}$ , а також на форму напруги  $E_1$  первинної обмотки трансформатора впливає нелінійна взаємодія між ЕРС джерела і ЕРС обертання. Крім цього фактора амплітуда і фаза основних гармонік напруг  $E_{06}$  і  $E_1$  визначаються величинами навантаження схеми і кута зсуву вектора ЕРС обертання щодо вектора основної гармоніки  $E_1^{(1)}$ . На основі встановлених фактів розроблена математична модель процесів у системі ВТІ-АД у сталому режимі, що відрізняється від відомих урахуванням нелінійної взаємодії між ЕРС обертання і ЕРС джерела, обумовленої наявністю в схемі вентилів. Розроблена модель дозволяє визначити амплітуду і фазу основних гармонік напруг у досліджуваній системі в сталому режимі в залежності від параметрів схеми заміщення, регулювання і навантаження.

4. Науково обгрунтовані раціональні параметри схеми заміщення ВТІ (індуктивності обмоток трансформатора  $L_1$ ,  $L_2$ ), а також значення керованих величин при фазовому регулюванні діючого значення вихідної напруги (частота  $f$  і кута провідності  $\beta$ ) для умов шахтного акумуляторного електровоза АМ-8д. Основний критерій - відповідність механічних координат приводного АД умовам короткочасного режиму тривалістю 60 хв. Додатковою умовою є мінімум споживаного струму і фіксоване значення робочого магнітного потоку. У результаті для приводу електровоза АМ-8д потужністю 23 кВт (режим S2) визначені такі параметри схеми заміщення ВТІ і відповідні до заданого режиму роботи частота і кут провідності:  $L_1 = 0,0127$  Гн;  $L_2 = 0,2354$  Гн;  $f = 47,7$  Гц;  $\beta = 61,7$  ел.гр.

5. Обгрунтовані математичні залежності, що визначають раціональні співвідношення між керованими величинами приводу електровоза АМ-8д на основі електромеханічної системи ВТІ-АД у всьому діапазоні варіювання механічних координат, зумовленому заданою механічною характеристикою приводу. Отримані залежності відрізняються від відомих урахуванням при їхньому обгрунтуванні характерних рис схеми автономного інвертора, а також урахуванням специфічних вимог до тягового приводу, що оснащений автономним джерелом живлення. Дані залежності дозволяють визначити величини і співвідношення частот і кутів провідності, що забезпечують ефективне і економічне регулювання режимів роботи асинхронного приводу шахтного електровоза в залежності від споживаного струму і частоти обертання ротора електродвигуна при роботі на заданій механічній характеристиці приводу.

6. Розроблені технічні рішення щодо реалізації блока захисту і керування.

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Маренич К.Н., Ставицкий Вл.Н. Актуальные вопросы эксплуатации шахтных аккумуляторных электровозов // Уголь Украины. – 1999. - №6. – С.25.

2. Маренич К.Н., Ставицкий Вл.Н., Ешан Р.В. Применение тиристорного триггера в качестве инвертора преобразователя частоты / Наука – практика: Научно-методический сборник. - Донецк: ДонГТУ. - 1998. - Выпуск 3. – С.247 - 249.

3. Маренич К.Н., Ставицкий Вл.Н. Обоснование параметров узла коммутации трехфазного автономного инвертора // Сб. научных трудов ДонГТУ (серия горно-электромеханическая). – Донецк: ДонГТУ. - 1999. - Выпуск 7. – С.169 - 174.

4. Ставицкий Вл.Н. Математическая модель процессов в электротехнической системе “вентильно-трансформаторный инвертор – асинхронный двигатель” // Сб. научных трудов ДонГТУ (серия горно-электромеханическая). – Донецк: ДонГТУ. - 2000. - Выпуск 16 – С.263 - 271.

5. Ставицкий Вл.Н., Ставицкий В.Н. Совершенствование матричных методов анализа электрических цепей / Наука – практика: Научно-методический сборник. - Донецк: ДонГТУ. - 2000. - Выпуск 5 – С.126 - 132.

6. Ставицкий Вл.Н. Математическая модель установившегося режима работы системы “вентильно-трансформаторный инвертор – асинхронный двигатель” // Сб. научных трудов ДонГТУ (серия горно-электромеханическая). – Донецк: ДонГТУ. - 2001. – Выпуск 27. - С.371-376.

7. Маренич К.Н., Ставицкий Вл.Н. Аккумуляторный электровоз с асинхронным приводом – новое решение для подвижного состава шахты // Сборник трудов IV Международной научно-технической конференции “Прогрессивные технологии машиностроения и современность” (Севастополь, 9 – 12 сентября 1997 г). – Донецк: ДонГТУ. – 1997. - Вып.5. - С.153 - 154.

8. Ставицкий Вл.Н. Исследование статических характеристик системы АИ-АД при частотном управлении // Сборник трудов V Международной научно-технической конференции “Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века” (Севастополь 8 – 11 сентября 1998 г). – Донецк: ДонГТУ. – 1998. - Вып.6. - С.120 – 122.

9. Ставицкий Вл.Н., Горб А.В. Результаты исследований установившихся процессов в приводе на основе вентильно-трансформаторного инвертора // Сборник научных трудов I Всеукраинской научно-технической конференции аспирантов и студентов “Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых” (Донецк 15 - 16 мая 2001 г). – Донецк: ДонГТУ. - 2001. – С.205 – 208.

10. Маренич К.М., Ставицкий В.М., Самойлов А.І. Обґрунтування технічних рішень для створення асинхронного частотно-регульованого електропривода шахтного акумуляторного електровозу // Матеріали науково-практичної конференції “Донбас – 2020: наука і техніка – виробництву” (Донецьк, 05 – 06 лютого 2002 р). – Донецьк: ДонНТУ. – 2002. – С.409 – 411.

**Особистий внесок автора у публікаціях:** [1] - проаналізована

статистична інформація з експлуатаційних показників шахтного локомотивного транспорту; [2] - розроблені алгоритм і система керування інвертором; [3] - запропонований ряд технічних рішень щодо удосконалювання схеми інвертора і зроблені теоретичні дослідження процесів під час примусової комутації тиристорів; [5] - запропонований удосконалений метод аналізу електричних кіл; [7] - виконані розробка і дослідження характеристик макетного зразка приводу; [9] - проаналізовані результати досліджень сталих процесів в електромеханічній системі ВТІ-АД; [10] - обгрунтовані раціональні співвідношення керованих величин асинхронного електроприводу на базі електромеханічної системи ВТІ-АД.

### **АНОТАЦІЯ**

Ставицький В.М. Математичне моделювання керованого асинхронного електропривода з вентиляно-трансформаторним інвертором для шахтного електровозу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Донецький національний технічний університет, Донецьк, 2002.

Дисертація присвячена питанням дослідження асинхронного електропривода з вентиляно-трансформаторним інвертором (ВТІ). Схема приводу дозволяє забезпечити узгодження відносно низької напруги джерела постійного струму з більш високою напругою асинхронного двигуна (АД) потужністю 20...50 кВт.

Розроблена комп'ютерна математична модель динамічних процесів у системі ВТІ-АД. Отримано математичний опис статичного режиму роботи системи. Результати досліджень використані під час визначення раціональних параметрів схеми інвертора. Науково обгрунтовані раціональні співвідношення керованих величин асинхронного приводу шахтного електровозу.

Проведені експериментальні дослідження лабораторного зразку приводу, які підтвердили адекватність отриманих теоретичних результатів.

Розроблені схема та алгоритм програмного забезпечення блоку захисту та керування.

Ключові слова: шахтний електровоз, електропривід, електромеханічна система, вентиляно-трансформаторний інвертор, раціональні параметри.

### **АННОТАЦИЯ**

Ставицкий В.Н. Математическое моделирование управляемого асинхронного электропривода с вентиляно-трансформаторным инвертором для шахтного электровоза. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Донецкий национальный технический университет, Донецк, 2002.

Диссертация посвящена вопросам исследования управляемого асинхронного электропривода с вентиляно-трансформаторным инвертором. Актуальность работы обусловлена низкими эксплуатационными характеристиками

привода постоянного тока, а также отсутствием приемлемых технических средств управления бесколлекторным приводом применительно к шахтному электровозу.

В качестве основы предложена оригинальная схема вентильно-трансформаторного инвертора (ВТИ). Специфическая схема привода обеспечивает согласование относительно низкого напряжения источника постоянного тока с более высоким напряжением асинхронного двигателя (АД) мощностью 20...50 кВт. Ее новизна обуславливает необходимость исследования процессов в электромеханической системе ВТИ-АД с целью последующего обоснования рациональных параметров схемы и управления приводом.

На основании совместного использования кусочно-припасовочного метода и матрично-топологической методики анализа электрических цепей разработана компьютерная математическая модель динамических процессов в системе ВТИ-АД, отличающаяся от известных учетом характерных состояний схемы, обусловленных проводимостью различных вентилях, а также учетом специфической трансформаторной связи между источником напряжения, двигательной нагрузкой и однофазными инвертирующими звеньями. Разработанная математическая модель позволяет исследовать влияние на процессы в системе ВТИ-АД параметров схемы, управляемых величин, а также специфического характера механической нагрузки привода.

Как частный случай разработанной модели получено математическое описание статического режима, отличающееся учетом обусловленного наличием вентилях нелинейного взаимодействия ЭДС вращения и ЭДС источника. Разработана компьютерная модель, учитывающая влияние ЭДС вращения на характер токов и напряжений в системе ВТИ-АД и позволяющая определить амплитуду и фазу основных гармоник напряжений на участках схемы в установленном режиме.

Результаты математического моделирования использованы при определении рациональных параметров схемы замещения вентильно-трансформаторного инвертора. Критерием оптимизации является соответствие механических координат привода параметрам часового режима при условии минимальной величины потребляемого системой тока и фиксированной величины рабочего магнитного потока. Определение рациональных параметров схемы производилось на основании методов теории планирования эксперимента.

Использование разработанных математических моделей электромеханической системы ВТИ-АД позволило научно обосновать математические зависимости, определяющие рациональные соотношения между управляемыми величинами исследуемого асинхронного привода применительно к электровозу АМ-8д во всем диапазоне варьирования механических координат, обусловленном заданной механической характеристикой привода. Полученные зависимости отличаются от известных учетом при их обосновании характерных особенностей схемы автономного инвертора, а также учетом специфических условий эксплуатации привода шахтного электровоза. Данные зависимости позволяют определить величины и соотношения частот и углов проводимости, обеспечи-

вающие эффективное и экономичное регулирование режимов работы привода шахтного электровоза в зависимости от потребляемого тока и частоты вращения ротора электродвигателя при работе на заданной механической характеристике привода. Результирующая механическая характеристика привода представляет собой геометрическое место точек статических режимов работы АД, обусловленных, во-первых, семейством искусственных механических характеристик двигателя, а, во-вторых, статическим моментом сопротивления.

Проведены экспериментальные исследования полномасштабного макетного образца привода, которые подтвердили адекватность разработанных теоретических положений.

Разработана схема и алгоритм программного обеспечения блока защиты и управления. Результаты диссертации использованы ДонНТУ в ходе выполнения госбюджетной научно-исследовательской работы № Н17-95 “Исследование процессов и разработка принципов совершенствования автоматизированного электропривода горных машин на основе применения тиристорных коммутаторов” и в учебном процессе в ходе преподавания курсов “Основы силовой преобразовательной техники и силовое преобразовательное оборудование шахт”, “Автоматизированный электропривод машин и установок шахт и рудников”.

Ключевые слова: шахтный электровоз, электропривод, электромеханическая система, вентильно-трансформаторный инвертор, рациональные параметры.

## THE SUMMARY

Stavitsky V.N. Mathematical modelling of the controlled asynchronous electric drive with the gate-transformer inverter for a mine electric locomotive. - Manuscript.

Thesis for a candidate's of technical sciences degree by speciality 05.09.03 - electric and engineering complexes and systems. - Donetsk national technical university, Donetsk, 2002.

The dissertation concerns of researching of the controlled asynchronous electric drive with the gate-transformer inverter (GTI). The original scheme of a drive allows to coordinate low voltage of a directive current source with higher voltage 20...50 kW asynchronous motor (AM).

It's developed the computer mathematical model of dynamic processes in GTI-AM system. It is received the mathematical description of static system mode of operations. The research results are used for definition of rational parameters of converter equivalent scheme. The rational parities between parameters of asynchronous drive management are scientifically proved for mine electric locomotive.

The experimental researches of a drive model sample are carried out. It have confirmed adequacy of the developed theoretical results. The circuit and software algorithm of the protection and management block is developed.

Key words: mine electric locomotive, electric drive, electrical and mechanical system, gate-transformer inverter, rational parameters.