МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

ПЕРЕДЕРІЙ ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ

УДК 62.83.52

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ-ІМІТАТОРОМ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗМІННОГО СТРУМУ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ СИЛОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Донецьк – 2013

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі систем програмного управління і мехатроніки ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки України, м. Донецьк.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Старостін Сергій Станіславович,
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри систем програмного управління і мехатроніки, м. Донецьк.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Родькін Дмитро Йосипович,
ДВНЗ «Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського»
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри систем автоматичного управління і електропривода, м. Кременчук;

кандидат технічних наук, доцент
Полілов Єгор Володимирович,
ДВНЗ «Донбаський державний технічний університет» Міністерства освіти і науки України,
доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем, м. Алчевськ.

Захист відбудеться «7» листопада 2013 р. о 13:15 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д11.052.02 в ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, навчальний корпус № 8, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, навчальний корпус №2.

Автореферат розісланий « 24 » вересня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д11.052.02 **А.М. Ларін**

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні напівпровідникові перетворювачі частоти (ПЧ) є складними пристроями, які до введення в експлуатацію проходять багатоетапні дослідження і випробування з метою перевірки якості та виключення аварійних ситуацій в процесі експлуатації. Випробування повинні проводитися у різноманітних режимах роботи та при відповідному навантаженні. Навантаженням ПЧ найчастіше є двигун, у складі електромеханічного навантажувального пристрою, а у разі спрощення, наприклад при теплових випробуваннях, використовується пасивне навантаження.

Випробування перетворювачів частоти на електромеханічному навантажувальному пристрої має наступні недоліки:

– потрібно підключати до електричної машини відповідної потужності кожен з випробуваних ПЧ, що потребує наявності великого парку навантажувальних електромеханічних установок;

– у разі дефекту випробувального ПЧ з ладу можуть вийти як сам перетворювач, так і двигун;

– механічна частина навантажувального пристрою накладає обмеження на параметри тестування та потребує сервісного обслуговування;

– для побудови навантажувальної електромеханічної установки потрібні масивні фундаменти, що набуває особливої ваги при великих потужностях.

З метою усунення наведених вище недоліків актуальним є перехід від навантажувальних випробувань ПЧ на електромашинних навантажувальних агрегатах до статичних пристроїв, які могли б імітувати струм двигуна згідно із навантаженням, що створює певна робоча машина. Таким статичним пристроєм може бути ще один перетворювач, що працює як навантажувальний. Але для того, щоб його струм збігався зі струмом двигуна, який імітується, треба синтезувати відповідні закони керування. При цьому керування здійснюється згідно параметрам конкретного двигуна з певним характером навантаження у відповідності з вихідною напругою ПЧ з використанням широтно-імпульсної модуляції. Питання побудови системи керування статичним перетворювачем-імітатором для навантаження випробуваного ПЧ з урахуванням дискретності їх роботи, узгодження роботи при різних частотах модуляції, впливу параметрів силових кіл на відпрацювання вихідного струму недостатньо вивчені потребують додаткових досліджень. Отже задача розробки системи керування статичним навантажувальним пристроєм для випробування і дослідження ПЧ на базі ПЧ є актуальним науковим питанням.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Науково-технічні розробки здійснено в якості виконавця при розробці науково-дослідної теми Н-5-05 «Синтез та автоматична настройка електромеханічних систем з урахуванням дискретних властивостей силових перетворювачів електроенергії» (номер держреєстрації 0105U002160).

Результати наукових розробок знайшли втілення у госпрозрахункових роботах кафедри СПУіМ за договорами №04-12 «Розробка методики та проведення випробувань частотно-регульованого електропривода MICROMASTER 440», №05-

12 «Розробка методики функціонування навантажувальної установки для випробувань перетворювачів частоти у стаціонарних режимах роботи», №06-12 «Дослідження функціонування навантажувальної установки при випробуваннях перетворювачів частоти у стаціонарних режимах роботи», виконаних у Донецькому національному технічному університеті за замовленням Філії «Інженерно-технічний центр «Сименс Україна» (м. Донецьк). При здійсненні цих розробок здобувач був відповідальним виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка системи керування статичним перетворювачем-імітатором, що забезпечить навантаження випробуваного ПЧ згідно параметрам конкретного двигуна відповідно характеру навантаження певної робочої машини.

Для досягнення поставленої мети в дисертації сформульовані наступні **задачі**:

1) розробити і виконати дослідження дискретних моделей асинхронного та синхронного двигунів, що дозволяють визначити завдання фазних струмів випробуваного ПЧ згідно його вихідним напругам;
2) визначити принципи реалізації регулювання струмів випробуваного ПЧ у відповідності з навантаженням двигуна;
3) розробити структури системи керування навантажувальним пристроєм на базі ПЧ;
4) виконати дослідження впливу параметрів навантажувального пристрою на якість відтворення струмів випробуваного ПЧ;
5) розробити мікропроцесорну систему керування та силову частину навантажувального пристрою;
6) виконати експериментальні дослідження навантажувального пристрою із подальшим аналізом і узагальненням отриманих результатів.

Об'єкт досліджень – електромагнітні процеси в перетворювачах частоти та електродвигунах змінного струму.

Предмет досліджень – структура системи керування навантажувальним пристроєм на базі ПЧ.

Методи досліджень. В основу дослідження покладено методи теорії автоматичного регулювання для реалізації цифрового регулювання фазних струмів, методи Z-перетворення, математичного моделювання для аналізу електромагнітних процесів електродвигунів змінного струму, теорії електропривода, метод фізичного моделювання та експериментального дослідження для підтвердження адекватності розроблених дискретних математичних моделей, а також для аналізу отриманих у роботі наукових результатів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1) одержали подальший розвиток методи керування електротехнічним навантажувальним пристроєм для проведення навантажувальних випробувань перетворювачів частоти, які відрізняються використанням дискретних моделей двигунів та регуляторів струму перетворювачів, що дозволяє покращити технічну ефективність випробувань перетворювачів частоти;
2) вперше розроблено дискретні моделі асинхронного та синхронного двигунів, які враховують особливості реалізації керування на базі мікроконтролеру, що

дозволяє визначити завдання на середні, за період модуляції навантажувального перетворювача, значення фазних струмів;

3) вперше досліджено вплив параметрів електротехнічного навантажувального пристрою на процес регулювання фазних струмів випробуваного перетворювача частоти, що дозволяє установити вимоги щодо реалізації навантажувального пристрою.

Практичне значення одержаних у роботі результатів:

– розроблена методика цифрового регулювання фазних струмів навантажувального перетворювача у відповідності із завданням від дискретної математичної моделі електродвигуна;

– розроблена математична модель навантажувального пристрою яку може бути використано для попереднього дослідження системи навантаження;

– створено лабораторний зразок експериментального стенду навантажувального пристрою і проведено експериментальні дослідження створеної системи керування навантажувального пристрою для імітації електродвигунів змінного струму у режимах пуску, збільшення моменту опору навантаження, зміни частоти напруги та циклічного навантаження.

Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджено у виробничий процес філії «Інженерно-Технічного Центру Сіменс Україна», та Українського науково-дослідного, проектно-конструкторського і технологічного інституту вибухозахищеного та рудникового електрообладнання з дослідно-експериментальним виробництвом. Основні положення роботи впроваджено у навчальний процес ДВНЗ «Донецький національний технічний університет».

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертації результати досліджень були апробовані на 6 (шести) науково-технічних конференціях: всеукраїнській науково-технічній конференції «Електромеханіка, Енергетика, Електротехніка» Донецького національного технічного університету (Донецьк, 2007 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації» Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського (Кременчук, 2008 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (Миколаївка, 2008 р.), міжнародній конференції “Compatibility in Power Electronics” (Польща, Гданськ, 2007 р.), міжнародному симпозіумі “2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics ” (Великобританія, Кембридж, 2008 р.), на всеукраїнській науково – технічної конференції викладачів, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об’єктів» Донецького національного технічного університету (Донецьк, 2012 р.).

Публікації. Результати дисертації відображено в 15 статтях в науково-технічних журналах і збірниках праць науково-технічних конференцій, з них 13 статей – в наукових фахових виданнях України, 2 статі – в наукових фахових виданнях закордону, у тому числі 9 – без співавторів.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації складає 187 сторінок, з них: 79 рисунки за текстом, 11 рисунків на 1 окремій

сторінці; 19 таблиць за текстом; 2 таблиці на 1 окремій сторінці; 109 найменувань використаних літературних джерел на 13 сторінках; 3 додатки на 23 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Аналіз електротехнічних навантажувальних пристроїв для випробування перетворювачів частоти» на основі науково-технічної літератури виконано аналіз існуючого стану реалізації навантаження для випробувань силових перетворювачів частоти. Визначено, що система навантаження випробуваного перетворювача частоти з постійним активно-індуктивним навантаженням або електромеханічною навантажувальною установкою має багато обмежень щодо електромеханічної та механічної частин, окрім цього конфігурація такої системи не може бути швидко змінена. Також виникає потреба у широкому парку електричних машин для проведення тестів з різними типами двигунів та діапазонами потужності.

Як альтернатива розглянуто навантажувальну установку з імітацію електродвигунів на базі силового перетворювача частоти, головні переваги якої полягають у наступному:

– зникає потреба у реалізації механічних навантажень, так як завдяки зміні параметрів моделювання можливо швидко, програмним шляхом, створити різноманітні комбінації навантажувальної установки та провести випробування;

– значно зменшується рівень шуму та необхідна площа під устаткування;

– безпечно проводиться відтворення аварійних ситуацій та перевантажень;

– стає можливим проведення навантажувальних випробувань перетворювачів частоти з різними типами робочих двигунів та режимами функціонування;

– значно зменшуються витрати електроенергії, особливо у разі тривалих випробувань, за умови рекуперації енергії до мережі.

Навантажувальна установка з імітацію електродвигунів утворює такі зовнішні сигнали, щодо перетворювача, які відповідають властивостям навантажувального технологічного механізму. У цьому разі замість реалізації механічної частини приводу у режимі реального часу розраховується її модель. Математичному опису піддаються властивості електродвигуна та зовнішнього навантаження. Параметри, тип двигуна та діаграма навантаження можуть бути змінені будь-якого часу, як вхідні данні до моделювання. Зміна навантаження відбувається програмним методом. На рис. 1 представлено структуру системи випробувань перетворювачів частоти за допомогою навантажувального перетворювача-імітатора електродвигуна. У цій системі випробувальний перетворювач підключено до іншого перетворювача-імітатора через дроселі. Перетворювач-імітатор керується процесором та впливає на струм дроселів через вихідну напругу. Вхідні змінні до математичної моделі робочої електричної машини змінного струму є виміряні значення вихідних фазних напруг випробуваного перетворювача частоти. У результаті моделювання визначаються завдання на фазні струми навантажувального перетворювача, таким чином імітується робоча електрична машина. Завдання на фазні струми відпрацьовуються регулятором струму.

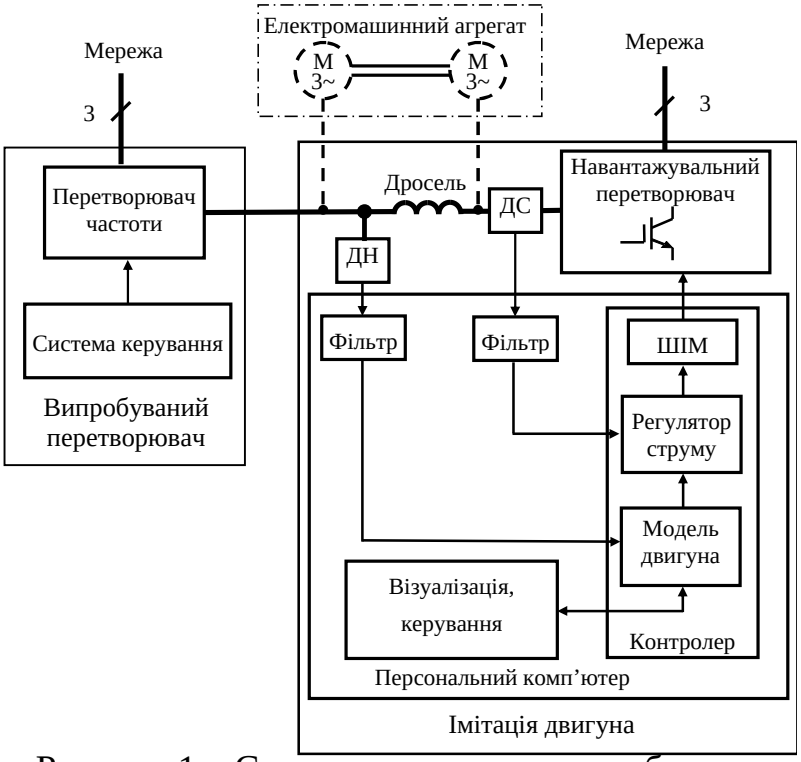


Рисунок 1 – Структура системи випробування перетворювачів частоти з навантажувальною установкою на базі імітації двигуна

У існуючих рішеннях реалізації навантажувальних установок формулюються лише вимоги щодо вибору основних експлуатаційних властивостей елементів системи, але не представлено методику їх визначення. Тож визначено необхідність розробити методику визначення параметрів фазних дроселів, розглянути методики визначення та ідентифікації параметрів електродвигунів змінного струму, провести відповідні експериментальні досліди. Потрібно доопрацювати питання вибору типу моделі двигуна у контексті створенням системи імітації робочої електричної машини, як таке що зумовлює суттєвий вплив на точність імітації, приділити увагу застосуванню новітніх дискретних математичних моделей. Ставиться завдання розробити специфічний перетворювач-імітатор для використання у якості навантажувального. З метою реалізації системи імітації слід виконати розрахунок параметрів регулятора струму. Для створеної реальної системи імітації електродвигунів змінного струму при навантажувальних випробуваннях силових перетворювачів частоти потрібно провести комплексні експериментальні дослідження системи.

У **другому розділі** «Система керування навантажувального пристрою для випробувань перетворювачів частоти» при визначенні моделі асинхронного двигуна прийнято, що: вхідними змінними моделі мають бути виміряні середні значення фазних напруг, які генерує силовий перетворювач, що підлягає випробуванням; модель повинна давати середні значення фазних струмів, які є завданням для системи управління перетворювачем-імітатором.

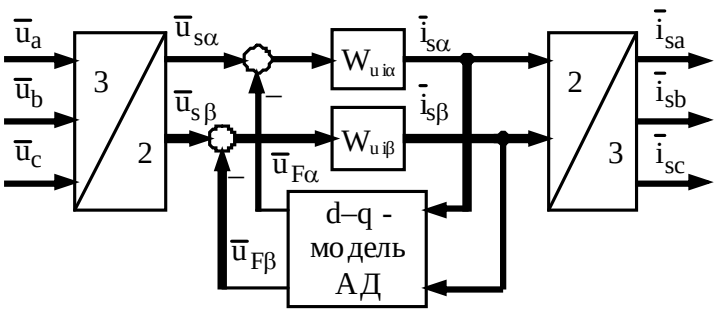


Рисунок 2 – Структурна схема формування завдань для системи управління перетворювачем - імітатором

У схемі (рис. 2) середні значення фазних напруг випробуваного перетворювача трансформуються у двофазну систему координат α-β. Далі визначаються очікувані середні значення струмів з урахуванням зворотного впливу асинхронного двигуна. При цьому використовується математична модель двигуна в системі координат d-q. І, врешті, після переходу до трифазної системи

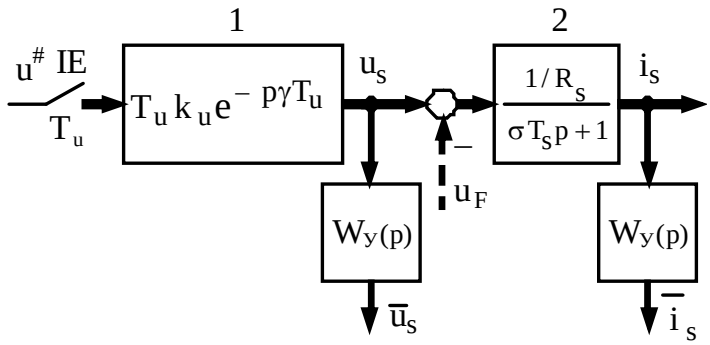


Рисунок 3 – Структурна схема до визначення передавальних функцій відносно складових статорного струму двигуна

координат маємо завдання щодо фазних струмів, які мусить сформувати навантажувальний перетворювач. Враховуючи дискретність функціонування силових перетворювачів і їхніх мікропроцесорних систем управління, передавальні функції $W_{ui\alpha}$, $W_{ui\beta}$ та модель асинхронного двигуна визначаємо у дискретному вигляді, що дозволяє безпосередньо застосувати їх при реалізації алгоритмів керування навантажувальним перетворювачем. Імпульсний вплив перетворювача при формуванні струмів асинхронного двигуна враховуємо на підставі структурної схеми, зображеної на рис. 3.

У схемі (рис. 3) імпульсний елемент IE та ланка 1 характеризує властивості перетворювача частоти: інтервал дискретності T_u, коефіцієнт передачі перетворювача за напругою k_u та відносну затримку формування імпульсу напруги γ. Ланка 2 відображає електромагнітні процеси у статорі двигуна. Особливості вимірювання середніх значень напруги та струму враховано за допомогою ланок усереднення з передавальною функцію $W_y(p)=[1–\exp(–T_u p)]/(T_u p)$.

З урахуванням схеми (рис. 3) отримуємо передавальну функцію

$$W_{ui}(z)=W_{ui\sim}(z)=W_{ui}\ (z)=\frac{\overline{i_s}(z)}{\overline{u_s}(z)}=\frac{1}{R_s}\frac{c_0+c_1 z^{-1}}{1-d_s z^{-1}}, \qquad (1)$$

де $\overline{i}_s$ – середнє значення складових струму статора;

$\overline{u}_s$ – середнє значення складових напруги статора;

R_s – активний опір обмотки статора двигуна;

$c_0=1-d_s^{1-\gamma}$; $c_1=d_s^{1-\gamma}-d_s$; $d_s=\exp(-T_u/\sigma T_s)$;

T_u – інтервал дискретності функціонування перетворювача;

σ – загальний коефіцієнт розсіювання;

T_s – електромагнітна стала часу статора.

Визначена передавальна функція (1) дозволяє на підставі виміряних середніх значень фазної напруги випробуваного перетворювача розрахувати очікувані середні значення фазних струмів асинхронного двигуна, що моделюється. Ці значення використовуватимемо як завдання для системи керування навантажувальним перетворювачем-імітатором.

Для моделювання зворотного впливу асинхронного двигуна взято до уваги класичне представлення двигуна в обертовій системі координат d-q, орієнтованої за вектором магнітозчеплення ротора двигуна (рис. 4).

У структурній схемі рис. 4 є передавальні функції та параметри:

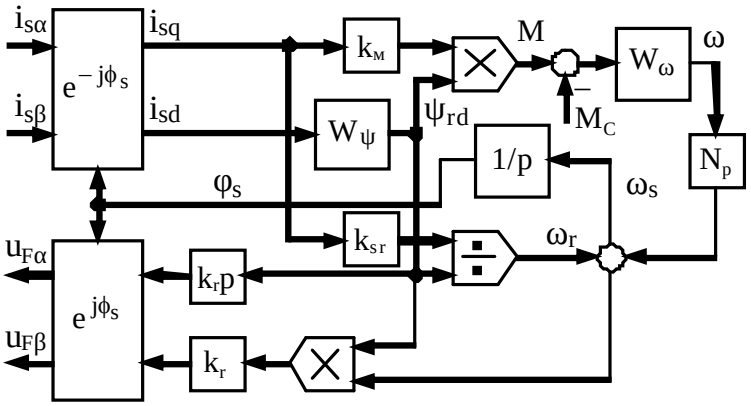


Рисунок 4 – Структурна схема моделі асинхронного двигуна

$$W_{\cdot}(p)=\frac{L_{sr}}{T_r p+1};\ W_{\mu}(p)=\frac{1}{J\,p};$$
$$k_{м}=\frac{3}{2}N_p k_r;\ k_r=\frac{L_{sr}}{L_r};\ k_{sr}=\frac{L_{sr}}{T_r}, \qquad (2)$$

де L_{sr} – індуктивність двигуна;
L_r – індуктивність ротора;
T_r – електромагнітна стала часу ротора;
N_p – число пар полюсів двигуна.

Слід відзначити, що координатні перетворення між трифазною, двофазною стаціонарною та обертовою системою координат є однаковими для миттєвих та середніх значень змінних. Між тим, операції множення та ділення, які мають місце у вихідній структурній схемі (рис. 4), є коректними тільки для миттєвих значень. Отже, при реалізації дискретної моделі асинхронного двигуна мусить бути перехід від середніх до миттєвих значень струму. Це забезпечує передавальна функція

$$W_{ii}^{\#}(z)=\frac{i_s(z)}{\overline{i}_s(z)}=\frac{T_u d_s^{1-¥}}{\pm T_s}\frac{1}{c_0+c_1 z^{-1}}\ . \qquad (3)$$

Крім того, враховуючи загальний підхід до визначення дискретних передавальних функцій, знайдено наступні передавальні функції:

$$\mathrm{W}_{\psi}^{\#}(\mathrm{z})=\frac{\psi_{\mathrm{r}}(\mathrm{z})}{\mathrm{i}_{\mathrm{S}}(\mathrm{z})}=\frac{\mathrm{f}_0+\mathrm{f}_1\mathrm{z}^{-1}}{1-\mathrm{d}_{\mathrm{r}}\mathrm{z}^{-1}}; \qquad (4)$$

$$W_{\mu}^{\#}(z)=\frac{\mu(z)}{M(z)-M_c(z)}\approx\frac{k_J}{2}\frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}; \qquad (5)$$

$$W_{\cdot\cdot s}^{\#}(z)=\frac{\ddot{\cdot}_s(z)}{\mu_s(z)}\approx\frac{T_u}{2}\frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}, \qquad (6)$$

де $f_0=\frac{\pm T_s L_{sr}(d_r^{«}/d_s^{«}-1)}{T_r-\pm T_s}$; $f_1=\frac{\pm T_s L_{sr}(d_r-d_r^{«}d_s/d_s^{«})}{T_r-\pm T_s}$;

$d_r = \exp(-T_u/T_r)$ – параметр електромагнітної сталої часу ротора двигуна;
$k_J = T_u/J$; $\mu = 1 - \gamma$.

Визначаємо передавальні функції, що характеризують зворотний вплив асинхронного двигуна:

$$W_{F1}^{\#}(z)=\frac{\overline{u}_{F\sim}(z)}{\cdot_{rd}(z)}\approx k_r\frac{1-z^{-1}}{T_u}\frac{1+z^{-1}}{2}\approx k_r\frac{1-z^{-1}}{T_u}z^{-1}\ , \qquad (7)$$

$$W_{F2}^{\#}(z)=\frac{\overline{u}_F(z)}{\cdot_{rd}(z)}\approx k_r\frac{1+z^{-1}}{2}\approx k_r z^{-1}. \qquad (8)$$

Спрощення в передавальних функцій (7) та (8) виконано задля усунення алгебраїчних контурів і можливості практичної реалізації моделі. Із цією ж метою додано ланку затримки на один інтервал дискретності на шляху змінної φ_S до блоку координатного перетворення $e^{-j\varphi s}$. При цьому структурна схема моделі має остаточний вигляд, зображений на рис. 5. Порівняльні дослідження неперервної та дискретної моделей асинхронного двигуна дали позитивні результати. Модель синхронного двигуна визначена за аналогічною методикою. Застосовані дискретні моделі двигунів дозволяють розрахувати електромеханічні процеси в розглянутій системі імітації з відносними похибками (у порівнянні з неперервною моделлю), які не перевищують: 7% - для фазних струмів, 5% - для швидкості обертання двигуна. Навантажувальний перетворювач-імітатор для виконання своєї функції мусить забезпечити фазні струми у відповідності із завданням, що формується за принципом, визначеним схемою, зображеною на рис. 2. Для вирішення такої задачі розглянемо схему заміщення фази силового кола, яку надано на рис. 6. У схемі враховано фазну напругу випробуваного (u_{Sx}) та навантажувального (u_{Lx}) перетворювачів, а також активний опір R_d та індуктивність L_d фазного дроселя.

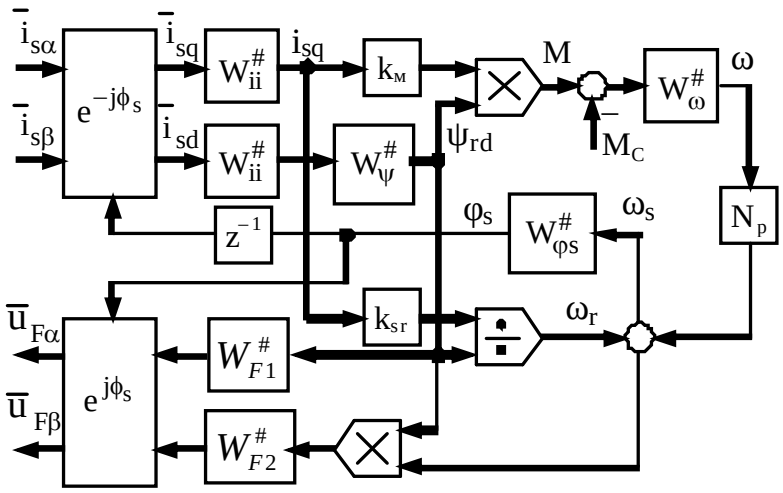


Рисунок 5 – Структурна схема дискретної моделі асинхронного електродвигуна

З урахуванням цієї схеми вплив на фазний струм із боку навантажувального перетворювача можна охарактеризувати структурною схемою, зображеною на рис. 7. У ланці 1, що характеризує перетворювач-імітатор, враховано додаткове запізнювання на один інтервал дискретності, пов’язане з особливостями реалізації ШІМ в контролері DS1104.

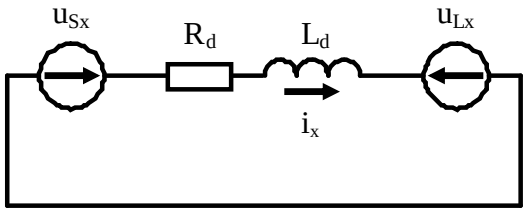


Рисунок 6 – Схема заміщення фази силового кола

Отже, з точки зору регулювання фазного струму i_X за допомогою навантажувального перетворювача напруга випробуваного перетворювача u_{Sx} є збуренням, але оскільки вона є вимірюваною, то це збурення можна напряму компенсувати. Вплив перетворювача-імітатора на струм характеризує передавальна функція у вигляді

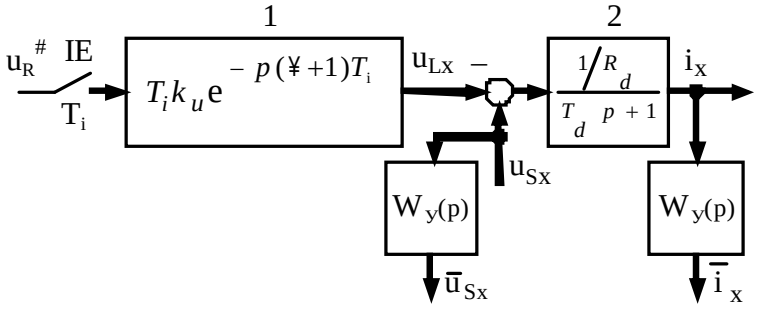


Рисунок 7 – Структурна схема об’єкта при регулюванні струму фази навантажувальної установки

$$W_{oi}(z)=\frac{\overline{i}_x(z)}{u_R^{\#}(z)}=Z\left\{T_i k_u e^{-p(¥+1)T_i}\frac{-1}{R_d}\frac{1}{T_d\,p+1}\frac{1-e^{-pT_i}}{T_i p}\right\}=-\frac{k_u}{R_d}\frac{c_1 z^{-2}+c_2 z^{-3}}{1-d_d z^{-1}} \qquad (9)$$

де T_i – інтервал дискретності функціонування навантажувального перетворювача; $d_d = \exp(-T_i/T_d)$ – параметр, що характеризує електромагнітну сталу фазного дроселя; $c_1 = 1-d_d^{1-¥}$; $c_2 = d_d^{1-¥}-d_d$.

Структурі контуру регулювання фазного струму відповідає рис. 8.

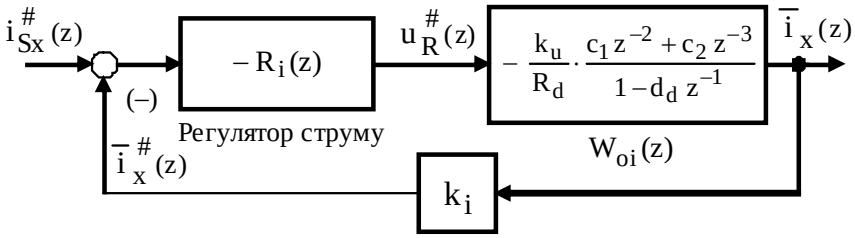


Рисунок 8 – Структурна схема контуру регулювання фазного струму

Регулятор фазного струму реалізуємо із умов отримання аперіодичного процесу регулювання струму, тобто виходячи з передавальної функції замкненого контуру

$$K_i(z)=\frac{\overline{i}_x(z)}{i_{Sx}^{\#}(z)}=\frac{1}{k_i}\frac{(1-d_a)\cdot(d_1 z^{-2}+d_2 z^{-3})}{1-d_a z^{-1}}, \qquad (10)$$

де $d_1=\frac{c_1}{c_1+c_2}$; $d_2=\frac{c_2}{c_1+c_2}$.

З урахуванням загального виразу для передавальної функції замкненого контуру

$$K_i(z)=\frac{\overline{i}_x(z)}{i_{Sx}^{\#}(z)}=\frac{R_i(z)\cdot W_{oi}(z)}{1+k_i R_i(z)\cdot W_{oi}(z)}, \qquad (11)$$

передавальна функція регулятора струму буде визначатися як

$$R_i(z)=\frac{u_R^{\#}(z)}{i_{Sx}^{\#}(z)-\overline{i}_x^{\#}(z)}=\frac{K_i(z)}{W_{oi}(z)[1-k_i K_i(z)]}. \qquad (12)$$

Отже, на підставі виразу (12), враховуючи рівняння (9) та (10), отримуємо

$$R_i(z)=\frac{u_R^{\#}(z)}{i_{Sx}^{\#}(z)-\overline{i}_x^{\#}(z)}=\frac{r_0+r_1 z^{-1}}{(q_0+q_1 z^{-1}+q_2 z^{-2})\cdot(1-z^{-1})}, \qquad (13)$$

де $r_0=\frac{R_d(1-d_a)}{k_i k_u}$; $r_1=-d_d r_0$; $q_0=c_1+c_2$; $q_1=(c_1+c_2)(1-d_a)$; $q_2=c_2(1-d_a)$.

При такому виборі передавальної функції та параметрів регулятора струму маємо реакцію контуру регулювання струму на стрибок завдання у відповідності до рис. 9.

Керуючий сигнал u_R інверторами перетворювачів частоти має обмеження. Якщо не враховувати це, то в разі виникнення обмеження керування присутнє суттєве змінення швидкодії регулювання струму. Отже, у алгоритмі регулювання струму необхідно врахувати можливе виникнення обмеження і забезпечити якісне регулювання при зникненні обмеження. Для цього на підставі передавальної функції (13) отримане різницеве рівняння

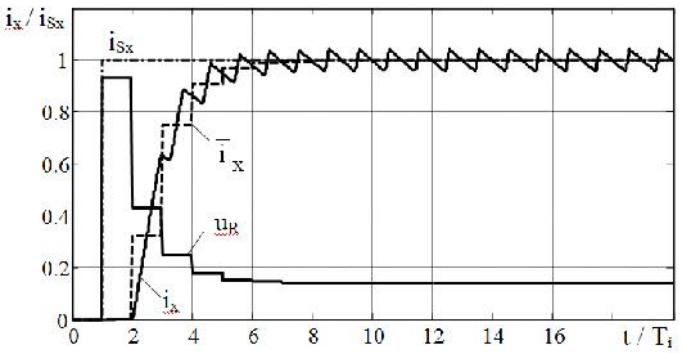


Рисунок 9 – Графік процесу регулювання струму при стрибку завдання (T_a=T_i).

$$u^{\#}_{R[n]} = u^{\#}_{R[n-1]} + k_1\Delta i^{\#}_{[n]} - k_2\Delta i^{\#}_{[n-1]} - \\ - k_3\Delta u^{\#}_{R[n-1]} - k_4\Delta u^{\#}_{R[n-2]}, \quad (14)$$

де $k_1 = r_0/q_0$; $k_2 = -r_1/q_0$; $k_3 = q_1/q_0$; $k_4 = q_2/q_0$;

$\Delta i^{\#}_{[n]} = i^{\#}_{S[n]} - i^{\#}_{[n]} - похибка\ \ регулювання$;

$\Delta u^{\#}_{R[n]} = u^{\#}_{R[n]} - u^{\#}_{R[n-1]}$.

Із рівняння (14) маємо

$$\Delta i^{\#}_{[n]} = \frac{1}{k_1}\left(k_2\Delta i^{\#}_{[n-1]} + \Delta u^{\#}_{R[n]} + k_3\Delta u^{\#}_{R[n-1]} + k_4\Delta u^{\#}_{R[n-2]}\right). \quad (15)$$

З урахуванням чого

$$\Delta i^{\#}_{[n-1]} = \frac{1}{k_1}\left(k_2\Delta i^{\#}_{[n-2]} + \Delta u^{\#}_{R[n-1]} + k_3\Delta u^{\#}_{R[n-2]} + k_4\Delta u^{\#}_{R[n-3]}\right). \quad (16)$$

Використання при реалізації регулювання струму в рівнянні (14) (n-1) - значення похибки, що розраховується у відповідності до (16), дозволяє врахувати можливе обмеження керуючого сигналу u_R. При цьому на закінчення процесу регулювання не буде впливати рівень обмеження.

Змінення у напрузі випробуваного перетворювача мають ефект збурень на процес регулювання фазного струму. Оскільки напруга випробуваного перетворювача є вимірюваною, то можливо реалізувати безпосередню компенсацію збурень. Для визначення передавальної функції передуправління $W_v(z)$ виходимо з того, що при об'єкті регулювання з передавальною функцією (9) процес кінцевої тривалості з максимальною швидкодією характеризує вираз (17)

$$K_i(z) = \frac{\overline{i}_x(z)}{i^{\#}_{Sx}(z)} = \frac{1}{k_i}\frac{d_1 z^{-2} + d_2 z^{-3}}{1 - d_d}. \quad (17)$$

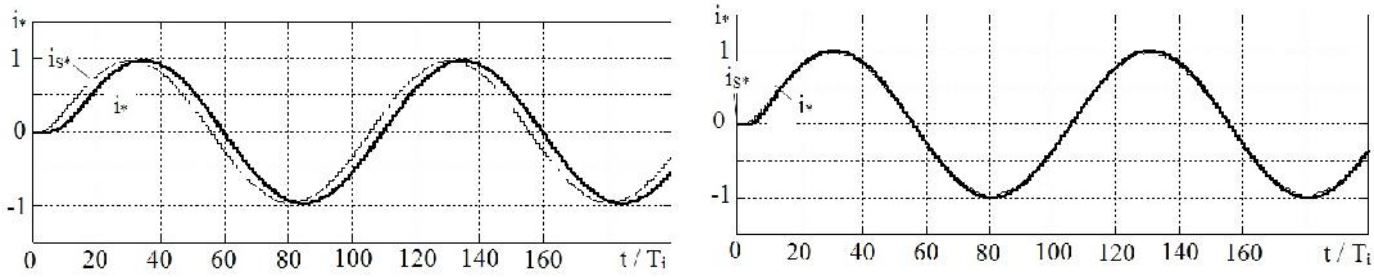
Такий процес за рахунок впливу по каналу передуправління буде забезпечено при виконанні умови

$$W_v(z)W_{oi}(z) = K_i(z), \quad (18)$$

з урахуванням чого отримуємо

$$W_v(z) = \frac{K_i(z)}{W_{oi}(z)} = \frac{R_d}{k_u k_i}\frac{1 - d_d z^{-1}}{1 - d_d}. \quad (19)$$

У результаті реалізації передуправління при відпрацюванні синусоїдального сигналу від випробуваного перетворювача присутній ефект, який характеризує рис. 10. При цьому відносна похибка регулювання не перевищує: 3-19% - для фазних струмів (менші значення відхилень відповідають статичним, а більші - динамічним режимам). У разі застосування передуправління: 1-7%. Реалізація передуправління забезпечує зменшення максимальної динамічної похибки регулювання приблизно в 6 разів. При цьому заданий та фактичний сигнали струму практично співпадають.



а) без передуправління б) з передуправління

Рисунок 10 – Графіки процесів регулювання фазного струму перетворювачів

Третій розділ «Дослідження процесів імітації навантаження перетворювачів частоти» присвячено комп’ютерному моделюванню навантажувальної установки за допомогою пакета Matlab/Simulink. Загальну схему моделі надано на рис. 11.

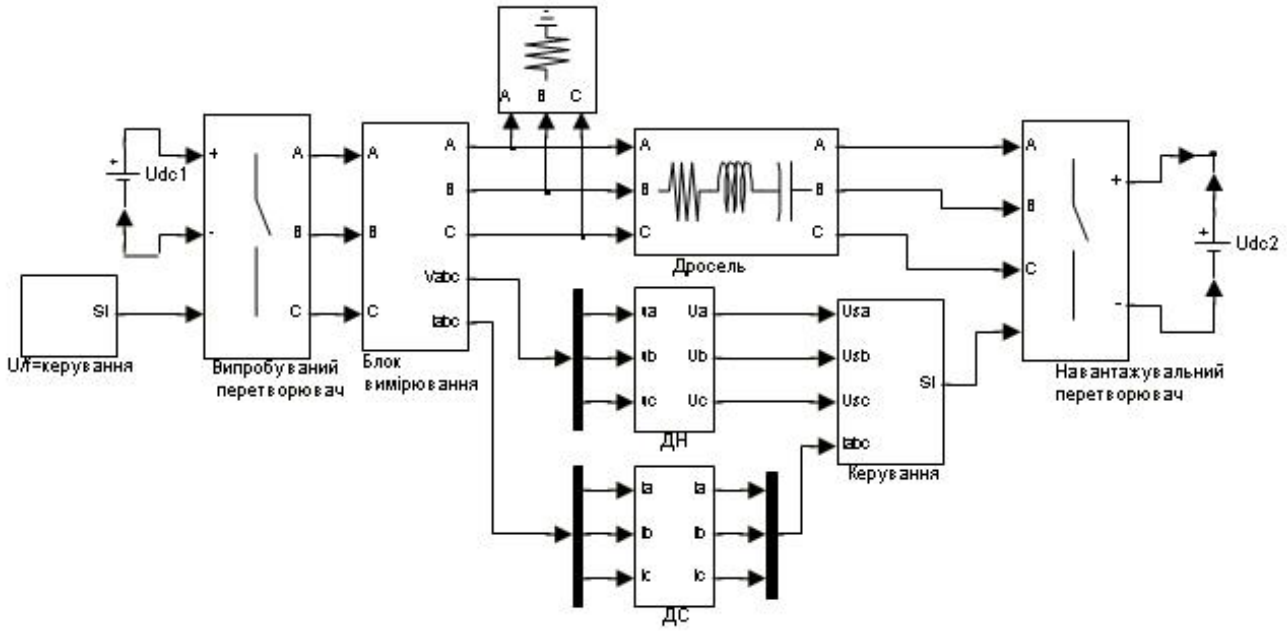


Рисунок 11 – Загальна схема моделі навантажувальної установки

Модель силової частини побудовано на базі елементів із набору Power System Blockset. Для моделювання системи управління застосовано елементи із загального набору Simulink. У моделі блоки датчика напруги (ДН) та датчика струму (ДС) забезпечують визначення середніх значень величин. Для випробуваного перетворювача здійснено стандартне U/f-керування. Блок керування здійснює управління навантажувальним перетворювачем-імітатором. Середні значення фазних напруг перетворюються у двофазну систему координат. На основі дискретної математичної моделі визначаються завдання на середні значення фазних струмів навантажувального перетворювача. Завдання обробляються блоками регулювання струму та передуправління. На основі їх вихідних сигналів визначаються відносні значення тривалості керуючих імпульсів з урахуванням яких формуються імпульси керування перетворювачем-імітатором.

З використанням розробленої функціональної моделі навантажувальної установки було проведено дослідження із метою перевірки розроблених алгоритмів управління навантажувальним перетворювачем. Рис. 12 відображає результати моделювання навантажувальної установки з імітацією процесу розгону

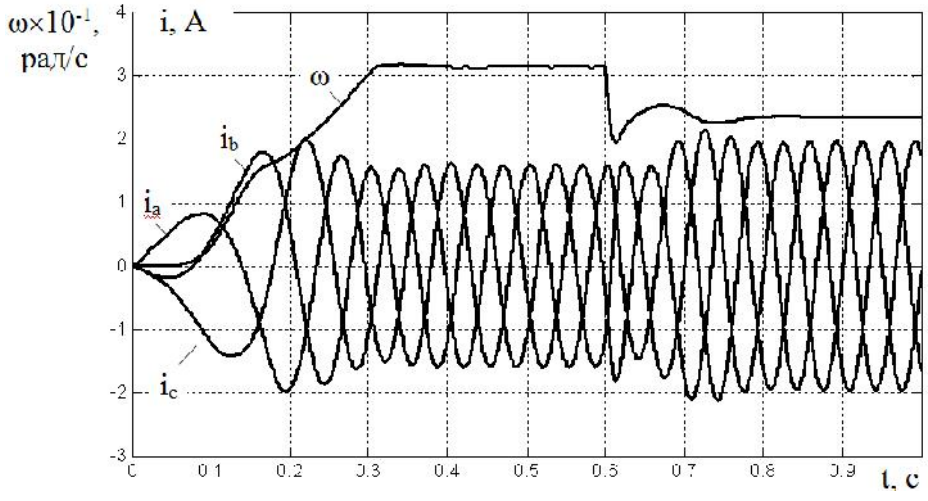


Рисунок 12 – Часові діаграми моделювання

асинхронного двигуна до заданої швидкості обертання без навантаження в режимі U/f-керування випробуваним перетворювачем.

В момент часу t = 0,6 с при стаціонарному режимі роботи змодельовано накид навантаження M_C, який дорівнює 5 Н·м. У результаті збільшення навантаження зростає рівень фазних струмів, що відповідає вимогам навантажувальних випробувань.

Розглянуто вплив значень параметрів дроселя та співвідношення частот модуляції перетворювачів на похибку регулювання фазних струмів. Визначено що стабільне моделювання навантажувальної установки можливо при відхиленні значень сталої часу дроселя від номінальної у діапазоні $0,02 < T_d/T_{do} < 5,0$, співвідношення частот модуляції випробуваного та навантажувального перетворювачів $T_i/T_u > 2,5$, більше значення співвідношення частот модуляції не має суттєвого впливу на максимальну похибку. Опрацьовано питання асинхронної роботи каналів формування управління навантажувального та випробуваного перетворювачів. Встановлено що при значенні часу затримки $T_a>0,25T_i$ значно зростає максимальна похибка фазних струмів двигуна, та досягає максимального значення при кратності значення часу затримки $T_a=0,5T_i$ однак це не має істотного впливу на стабільність моделювання системи імітації. Досліджено вплив значення затримки у каналі формування управління перетворювачем-імітатором на похибку регулювання струмів. При значенні неврахованої затримки у каналі формування управління $T_z>0,5T_i$ є значною максимальна похибка та стає не можливим стабільне моделювання навантажувальної установки. Розглянуто динамічні властивості перетворювача-імітатора у контексті впливу співвідношення частот модуляції випробуваного та навантажувального перетворювачів, тобто інтервалів дискретності, на похибку регулювання фазних струмів. Значення похибки у динамічному режимі менше за 4,4 % від номінального струму двигуна досягається для співвідношення інтервалів дискретності функціонування випробуваного та навантажувального перетворювачів $T_i/T_u>150$. Зроблено висновок що практична реалізація системи імітації динамічних властивостей електродвигунів змінного струму потребує створення специфічних перетворювачів.

У **четвертому розділі** «Дослідження функціонування експериментального стенду навантажувальної установки» проведено комплексні дослідження функціонування експериментального стенду навантажувальної установки без застосування електромашинного агрегату. Прототип навантажувальної установка крім випробуваного перетворювача має тільки перетворювач-імітатор, який поєднується з випробуваним перетворювачем через фазні дроселі.

Управління перетворювачем-імітатором здійснюється у функції напруг випробуваного перетворювача, таким чином, щоб фазні струми були подібні до струмів електродвигуна. У відповідності до розглянутих принципів у результаті науково-технічних розробок створено лабораторний стенд навантажувальної установки, структуру якої надано на рис. 13. В установці встановлено два перетворювача частоти UZ1 (1,1 кВт) та UZ2 (5 кВт). Перетворювач UZ1 є випробуваним пристроєм, струмове навантаження для якого забезпечує перетворювач-імітатор UZ2. Силова частина підключається до мережі 380В через контактор KM1. Силові перетворювачі UZ1 та UZ2 отримують живлення через автоматичні вимикачі QF1, QF2, що забезпечує їхній захист за максимальним струмом. Обидва перетворювачі частоти мають стандартну побудову із вхідним діодним випрямлячем, проміжною ланкою постійної напруги, гальмовим резистором R_B та транзисторним інвертором напруги.

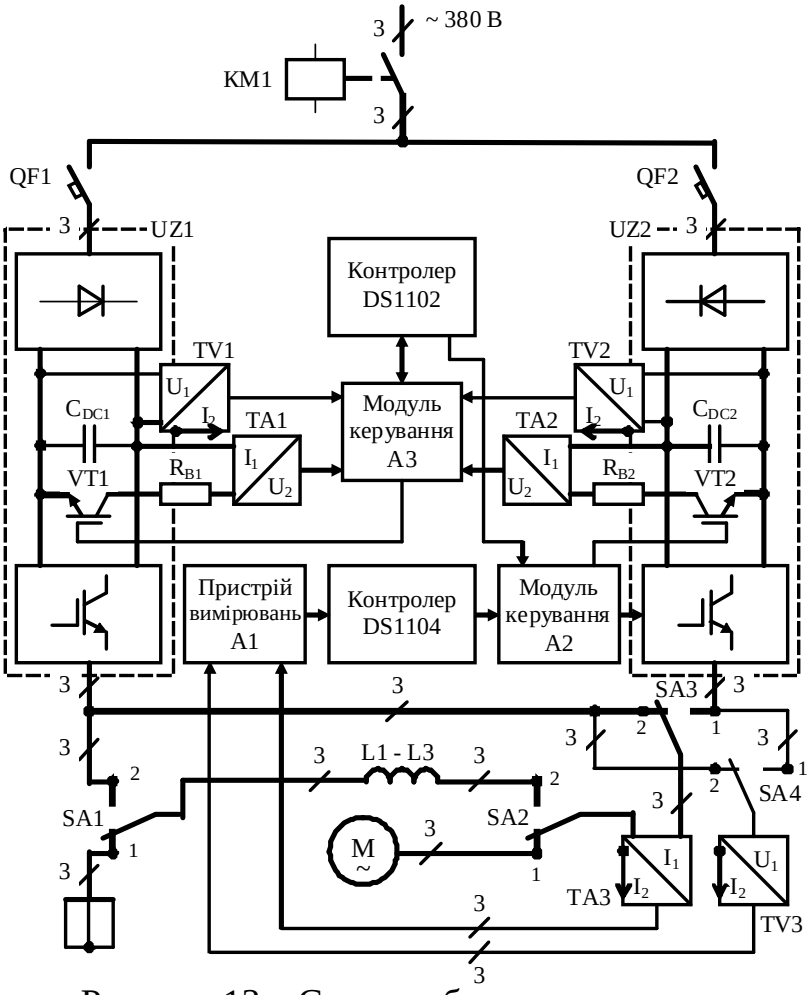


Рисунок 13 – Схема лабораторного стенду навантажувальної установки

Керування перетворювачем частоти UZ1 забезпечує серійний контролер, що входить до складу перетворювача. Для здійснення управління перетворювачем-імітатором UZ2 застосовано контролер DS1104 який програмується на підставі функціональних схем, заданих у пакеті комп’ютерного моделювання Matlab/Simulink. Контролер отримує інформацію від пристрою вимірювань A1 щодо середніх значень фазних напруг та струмів. Первинні сигнали для пристрою вимірювань забезпечують датчик фазних струмів TA3 та датчик фазних напруг TV3. Вплив контролера DS1104 на інвертор перетворювача UZ2 реалізовано через пристрій керування A2. В установці застосовано мікропроцесорний контролер DS1102, який здійснює регулювання напруги на конденсаторах проміжних ланок перетворювачів на основі контролю напруги за допомогою датчиків напруги TV1 та TV2 і реалізує керування силовими транзисторами VT1 та VT2, які підключають гальмові резистори R_{B1} та R_{B2}, забезпечуючи стабілізацію напруги проміжних ланок на заданому рівні. Рівень струму через резистори R_{B1}, R_{B2} контролюється завдяки датчикам TA1 та TA2. Зв’язок контролера DS1102 з датчиками та силовими транзисторами реалізовано за

допомогою пристроїв керування А3 та А2. В установці є силові перемикачі SA1 – SA3, які дозволяють здійснювати оперативну модифікацію силової частини: або підключати до кожного з перетворювачів асинхронний електродвигун М, або з’єднувати обидва перетворювача через дроселі L1 – L3. Також передбачено перемикач SA4, який забезпечує підключення датчика фазних напруг TV3 до виходу одного з перетворювачів.

На експериментальному стенді електропривода проведено дослідження адекватності дискретних моделей асинхронного та синхронного двигунів, у режимі реального часу, які підтвердили точність побудови моделей.

Первинну перевірку функціонування контролера DS1104 та перетворювача-імітатора при регулюванні фазного струму було виконано в режимі роботи на фазні дроселі, підключені за схемою "зірка". При цьому відпрацювання стрибка завдання підтвердило правильність теоретичних обґрунтувань, про що свідчать графіки процесу регулювання фазного струму при стрибку завдання на рис. 14.

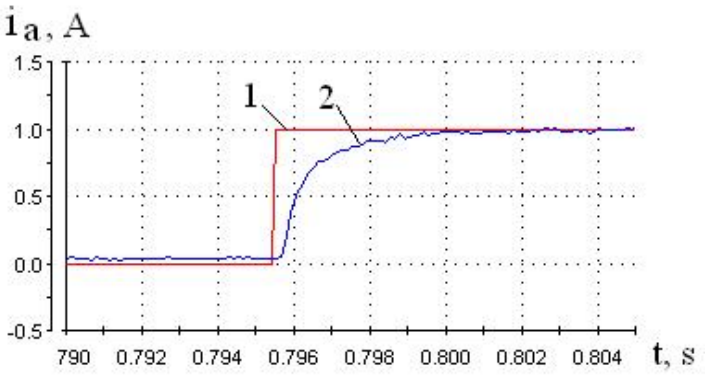
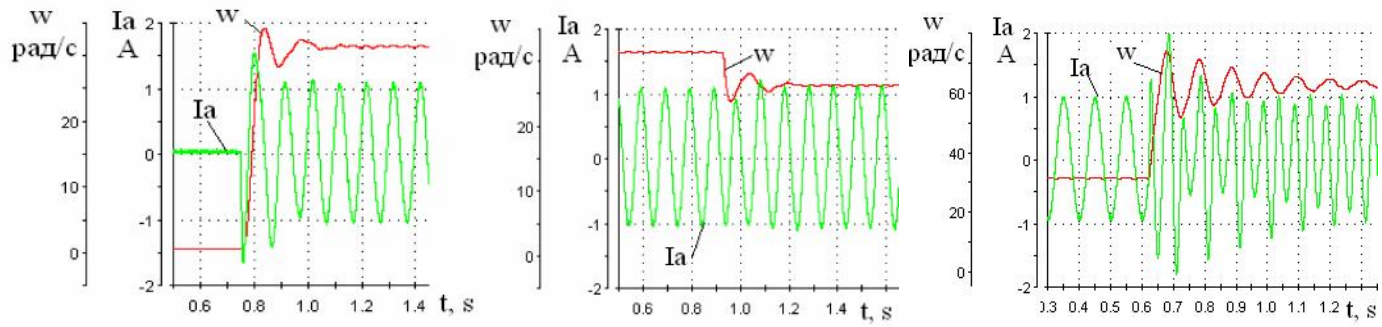


Рисунок 14 – Процес регулювання струму при стрибку завдання (1 - завдання на струм; 2 - виміряний струм)

У наступних експериментальних дослідженнях перетворювач-імітатор використовувався замість електромашинного навантажувального агрегату. На підставі експериментально отриманих даних були розраховані вхідні дані для моделі асинхронного двигуна роботу якого імітує керований системою регулювання струмів перетворювач-імітатор. При проведенні експериментальних досліджень використано фазні дроселі із параметрами R_d=10,8 Ом, L_d = 67,5 мГн, T_d = 6,25 мс, які відповідають параметрам вибраного асинхронного двигуна. Випробуваний перетворювач функціонував із інтервалом дискретності T_{up} = 0,5 мс (частота модуляції f_{up} = 2 кГц). У навантажувальному перетворювачі інтервал дискретності становив T_{ul} = 0,125 мс (f_{ul} = 8 кГц). Регулювання напруги проміжних ланок здійснювалося з інтервалом дискретності T_B = 1 мс (f_B = 1 кГц).

Проведено імітаційне моделювання пуску, збільшення навантаження та частоти напруги асинхронного двигуна та отримані графіки струму фази А (Ia) випробуваного перетворювача навантаженого перетворювачем-імітатором та швидкості обертання двигуна (w) що представлені на рис. 15. Як видно з наведених графіків процеси перебігу струму та швидкості обертання асинхронного двигуна отримані у разі імітації без застосування електромашинного навантажувального агрегату відповідають процесам реального електропривода.

Для режиму тестування отримані відповідні графіки струму випробуваного перетворювача та швидкості обертання моделі двигуна що представлені на рис. 16.



а б в

Рисунок 15 – Струм фази А (Ia) випробуваного перетворювача та швидкість обертання (w) асинхронного двигуна що моделюється при імітації пуску (а), збільшення навантаження (б) та частоти напруги (в)

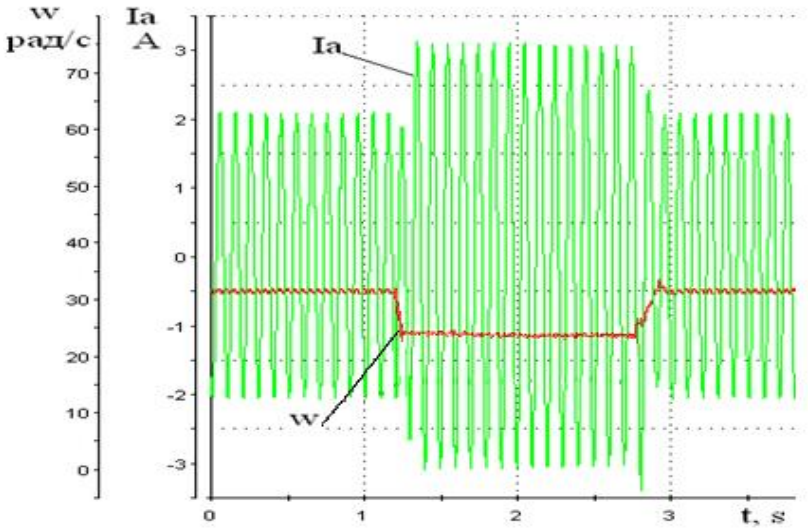


Рисунок 16 – Струм фази А (Ia) перетворювача, швидкість обертання (w) двигуна що моделюється

Наведені графіки підтверджують підвищення рівня фазного струму, а у разі зменшення моменту опору відповідно зменшення струму і, таким чином, збільшення та зменшення навантаження випробуваного перетворювача без застосування електромашинного навантажувального агрегату, що підтверджує досягнення поставленої мети дослідження.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача синтезу системи керування статичним перетворювачем-імітатором, через розробку дискретних моделей асинхронного та синхронного двигунів.

Основні наукові і практичні результати полягають у наступному:

1. Визначені дискретні моделі асинхронного та синхронного двигуна з урахуванням того, що: вхідними змінними моделі є виміряні середні за період модуляції значення фазних напруг за інтервал дискретності, які генерує силовий перетворювач, що підлягає випробуванням; модель визначає середні за період модуляції значення фазних струмів, які є завдання для системи управління перетворювачем-імітатором. Застосовані дискретні моделі двигунів дозволяють розрахувати електромеханічні процеси в розглянутій системі імітації з відносними похибками (у порівнянні з неперервною моделлю), які не перевищують: 7% — для фазних струмів, 5% — для швидкості обертання двигуна.

2. Реалізовано керування навантажувальним перетворювачем за принципом імітації електродвигуна з регулюванням фазних струмів. Запропоновано використання передуправління в функції напруги при регулюванні струму перетворювача-імітатора. Цифрове регулювання фазних струмів навантажувального перетворювача у відповідності із завданням від дискретної математичної моделі електродвигуна забезпечує покращення технічної ефективності керування навантажувальним перетворювачем.

3. У відповідності з обґрунтованою дискретною математичною моделлю асинхронного двигуна та з урахуванням розроблених алгоритмів управління навантажувальним перетворювачем здійснено комп’ютерне моделювання навантажувальної установки за допомогою пакета Matlab/Simulink, для попереднього дослідження системи навантаження.

4. Розглянуто вплив значень параметрів дроселя та співвідношення частот модуляції перетворювачів на похибку регулювання фазних струмів. Опрацьовано питання впливу здвигу опорних сигналів у каналах формування керування навантажувального та випробуваного перетворювачів на похибку регулювання фазних струмів. Досліджено вплив значення затримки у каналі формування управління перетворювачем-імітатором на похибку регулювання фазних струмів. Таким чином досліджено вплив параметрів електротехнічного навантажувального пристрою на процес регулювання фазних струмів випробуваного перетворювача частоти та установлено вимоги щодо реалізації навантажувального пристрою.

5. Розглянуто динамічні властивості перетворювача-імітатора у контексті впливу співвідношення частот модуляції випробуваного та навантажувального перетворювачів. Зроблено висновок, що практична реалізація системи імітації перехідних процесів струму електродвигунів потребує створення спеціальних перетворювачів.

6. Створено мікропроцесорну систему керування та силову частину експериментального стенду імітаційної навантажувальної установки. Розроблено та реалізовано алгоритми управління перетворювачем-імітатором. Досліджено адекватність дискретних моделей асинхронного та синхронного двигунів у режимі реального часу. Проведено експериментальні дослідження створеної системи керування перетворювачем-імітатором електродвигунів змінного струму для навантажувальних випробувань у режимах пуску, збільшення моменту опору, зміни частоти напруги та циклічного навантаження. Отримано позитивні результати експериментальних досліджень, чим підтверджено можливість використання перетворювача-імітатора замість електромашинного навантажувального агрегату, що збільшує технічну ефективність випробувань.

7. Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджено у виробництво філії «Інженерно-Технічного Центру Сіменс Україна», та Українського науково-дослідного, проектно-конструкторського і технологічного інституту вибухозахищеного та рудничного електрообладнання з дослідно-експериментальним виробництвом та в навчальний процес Донецького національного технічного університету на кафедрі «Системи програмного управління і мехатроніки» для підготовки фахівців за спеціальністю «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Старостін С. С. Дискретна математична модель асинхронного двигуна / С. С. Старостін, О. В. Передерій // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КДПУ, - 2007. – Вип. 1. – С. 53 - 56.

2. Передерій О. В. Дослідження впливу значень параметрів дроселя на похибку регулювання фазних струмів при імітації електродвигунів змінного струму / О. В. Передерій // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2010. - С. 255 - 260.

3. Передерій О. В. Імітація навантаження електроприводу поздовжньо-стругального верстату / О. В. Передерій // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – Вип. 10 (180). – С. 133 - 137.

4. Передерій О. В. Дослідження впливу співвідношення частоти модуляції перетворювачів на похибку регулювання сили вихідних струмів / О. В. Передерій // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2012. - С. 154 - 164.

5. Передерий А. В. Анализ процессов самонастройки регуляторов тока в системе управления асинхронного электропривода / А. В. Передерий // Електромашинобудування та електрообладнання. – Київ: «Техніка», 2006. – Вип. 67. – С. 5 - 9.

6. Передерий А. В. Анализ влияния температуры двигателя на процесс самонастройки регулятора тока в системе управления асинхронного электропривода / А. В. Передерий // Електромашинобудування та електрообладнання. – Київ: «Техніка», 2006. – Вип. 66. – С. 52 - 53.

7. Передерій О. В. Експериментальні дослідження адекватності дискретної математичної моделі асинхронного двигуна / О.В. Передерій // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 3. Част. 2. – С. 175 - 178.

8. Передерій О. В. Експериментальне визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна / О. В. Передерій, С. С. Старостін // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2007. – Вип. 7 (128). – С. 49 - 53.

9. Передерій О. В. Ідентифікація опору ротора асинхронного двигуна з урахуванням ефекту витіснення струму / О. В. Передерій // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 3. Част. 1. – С. 99 - 102.

10. Передерій О. В. Аналіз методів визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна / О. В. Передерій // Електромашинобудування та електрообладнання. – Київ: «Техніка», 2009. – Вип. 73. – С. 36 - 42.

11. Передерій О. В. Ідентифікація параметрів статорного кола синхронного двигуна / О. В. Передерій, С. С. Старостін // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С. 142 - 145.

12. Калашніков В. І. Керування установкою для навантажувальних випробувань перетворювачів частоти / В. І. Калашніков, О. В. Передерій, С. С. Старостін // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – № 30. – С. 404 - 405.

13. Starostin S. Discrete-Time Model of Voltage Source Inverter and Its Application / Starostin S., Perederiy O. // 5th International Conference-Workshop "Compatibility in Power Electronics" – Gdynia: May 29 – June 1 2007. – Page(s): 1 – 6.

14. Starostin S. Current Control of a Voltage Source Inverter at the Load Testing of Frequency Converters / Sergiy Starostin, Oleksander Perederiy // 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – Cambridge: 30 June – 2 July 2008. - pp. 390 - 392.

15. Передерій О. В. Експериментальні дослідження функціонування прототипу навантажувальної установки / О. В. Передерій // Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів. Збірник наукових праць І Всеукраїнської науково-технічної конференції викладачів, аспірантів і студентів. – Донецьк: «ДВНЗ» ДонНТУ, 18 - 19 жовтня 2012. – С. 151 - 152.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: в [1] визначення дискретної математичної моделі асинхронного двигуна; у [8] проведення ідентифікації параметрів асинхронного двигуна за допомогою тестових частотних сигналів; в [11] проведення ідентифікації параметрів синхронного двигуна; у [12] створення експериментальної навантажувальної установки та проведення експериментів; у [13] проведення моделювання дискретної моделі двигуна; в [14] проведення експериментального дослідження лабораторної установки.

АНОТАЦІЇ

Передерій О. В. Система керування перетворювачем-імітатором електродвигунів змінного струму для випробувань силових перетворювачів частоти. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – ДВНЗ «Донецький національний технічний університет». – Донецьк, 2013.

Дисертацію присвячено розв'язанню науково-практичної задачі синтезу системи керування статичним перетворювачем-імітатором, через розробку дискретних моделей асинхронного та синхронного двигунів.

Розроблено дискретні моделі асинхронного та синхронного двигунів, що визначають завдання на середні значення фазних струмів випробуваного перетворювача. Досліджено вплив та визначено вимоги щодо значень параметрів системи імітації на якість регулювання фазних струмів перетворювача частоти. Реалізовано цифрове регулювання фазних струмів навантажувального перетворювача у відповідності із завданням, що формується за принципом імітації електродвигуна. Підвищено якість регулювання струмів перетворювача-імітатора. Створено лабораторний стенд навантажувальної установки, проведено випробування перетворювачів частоти з застосуванням перетворювача-імітатора.

Ключові слова: випробування перетворювачів частоти, електродвигун, дискретна математична модель, імітація, цифрове регулювання, навантаження.

Передерий А. В. Система управления преобразователем-имитатором электродвигателей переменного тока для испытаний силовых преобразователей частоты. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет». – Донецк, 2013.

Диссертация посвящена решению научно-практической задачи синтеза системы управления статическим преобразователем-имитатором, через разработку дискретных моделей асинхронного и синхронного двигателей.

Для испытания силовых преобразователей частоты предлагается заменить электромашинный нагрузочный агрегат электрической установкой без механической части. Электрическая установка состоит из системы управления и управляемого ею силового преобразователя-имитатора электродвигателя переменного тока. Система управления реализует регулирование фазных токов преобразователей, причем задание на фазные токи рассчитывает дискретная математическая модель электродвигателя переменного тока на основе выходного напряжения испытываемого преобразователя.

Определены дискретные модели асинхронного и синхронного двигателя с учетом того, что: входными переменными модели являются измеренные средние за период модуляции испытываемого силового преобразователя значение фазных напряжений; модель определяет средние за период модуляции значение фазных токов, которые являются заданием для системы управления преобразователя-имитатора.

Реализовано управление нагрузочным преобразователем по принципу имитации электродвигателя с регулированием фазных токов. Предложено использование предуправления в функции напряжения при регулировании тока преобразователя-имитатора. При этом относительная погрешность регулирования не превышает: 3-19% - для фазных токов (меньшие значения отклонений соответствующих статическим, а большие - динамичным режимам). В случае применения предуправления относительная погрешность равна: 1-7%. Цифровое регулирование фазных токов нагрузочного преобразователя в соответствии с заданием от дискретной математической модели электродвигателя обеспечивает улучшение технической эффективности управления нагрузочным преобразователем.

Для предварительного исследования системы нагрузки, в соответствии с обоснованной дискретной математической моделью асинхронного двигателя и с учетом разработанных алгоритмов управления нагрузочным преобразователем, реализовано компьютерное моделирование нагрузочной установки с помощью пакета Matlab / Simulink. Рассмотрено влияние значений параметров дросселя и соотношения частот модуляции преобразователей на погрешность регулирования фазных токов, сдвига опорных сигналов в каналах формирования управления нагрузочного и испытуемого преобразователей на погрешность регулирования

фазных токов. Исследовано влияние значение задержки в канале формирования управления преобразователем - имитатором на погрешность регулирования фазных токов. Таким образом исследовано влияние параметров электротехнического нагрузочного устройства на процесс регулирования фазных токов испытуемого преобразователя частоты и установлены требования по реализации нагрузочного устройства. Рассмотрены динамические свойства преобразователя - имитатора в контексте влияния соотношения частот модуляции испытуемого и нагрузочного преобразователей. Сделан вывод, что практическая реализация системы имитации переходных процессов тока электродвигателей требует создания специальных преобразователей.

Создана микропроцессорная система управления и силовая часть экспериментального стенда имитационной нагрузочной установки. Разработаны и реализованы алгоритмы управления преобразователем-имитатором. Проведено исследование адекватности дискретных моделей асинхронного и синхронного двигателей в режиме реального времени. Выполнены экспериментальные исследования созданной системы управления преобразователем-имитатором электродвигателей переменного тока для нагрузочных испытаний в режимах пуска, увеличение момента сопротивления, изменения частоты напряжения и циклической нагрузки . Получены положительные результаты экспериментальных исследований, чем подтверждена возможность использования преобразователя-имитатора вместо электромашинного нагрузочного агрегата, что увеличивает техническую эффективность испытаний.

Ключевые слова: испытания преобразователей частоты, электродвигатель, дискретная математическая модель, имитация, цифровое регулирование, нагрузка.

Perederiy A. V. Control system of inverter-simulator AC electric motors for testing power converters. -As the manuscript.

Dissertation for the scientific degree of engineering sciences on specialty 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. – SHEE «Donetsk national technical university». Donetsk. – 2013.

The dissertation is devoted to solving scientific and technical task of synthesis of control systems, static converters simulators by developing discrete models of asynchronous and synchronous motors.

Designed discrete models of asynchronous and synchronous motors, set setpoints for the average values of the phase currents of the test drive. Examined the influence and the requirements to simulate the system parameters on the quality control phase current drive. Implemented digitally controlled phase current load inverter according to the task, which is formed on the principle of imitation motor. Improved the quality control current inverter-simulator by considering the influence of parameters of phase reactors, the modulation frequency ratio converters, clock mode load inverter-simulator and test drive. Established experimental stand loading installation and implemented load tests of the power converters using inverter-simulator.

Keywords: testing power converters, AC motor, a discrete mathematical model, simulation, digital control, loading installation.