

сетей. – М.: Высш. шк., 1975. – 280 с. 3. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Оболонский Д.И. Моделирование и компенсация влияния неоднородности электрических сетей на экономичность их режимов // *Электричество*. – 2007. – № 11. – С. 2–8. 4. Вариационные принципы механики: Сб. ст. / Под ред. Л.С. Полака. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. 932 с. 5. Гантмахер Ф.Р. Лекции по аналитической механике: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Е.С. Пятницкого. – 3-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 264 с. 6. Мякишев Г.Я. Динамические и статистические закономерности в физике. – М.: Наука, 1973. – 318 с. 7. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с. 8. Методы оптимизации режимов энергосистем / В.М. Горништейн, Б.П. Мирошниченко, А.В. Пономарев и др.; Под ред. В.М. Горништейна. – М.: Энергия, 1981. – 336 с. 9. Лежнюк П.Д., Ярных Л.В. Расчет токораспределения в электрической сети // *Электричество*. – 1982. – № 8. – С. 10–14. 10. Лежнюк П.Д., Нетребський В.В. Математичне моделювання оптимальних станів електроенергетичних систем на засадах принципу найменшої дії // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2007. – № 596: *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. – С. 73–78. 11. Лежнюк П.Д., Кулик В.В. Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 188 с.

УДК 681.586.78

Р.О. Мазманян

Інститут електродинаміки НАН України

СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИМІРЮВАЧІВ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ З АВТОМАТИЧНОЮ КОРЕКЦІЄЮ І КОМПЕНСАЦІЄЮ ПОХИБОК

© Мазманян Р.О., 2009

Подано синтезовані ієрархічні структури для комп'ютерного моделювання вимірювачів магнітної індукції з автоматичною корекцією адитивних і мультиплікативних похибок. Запропоновано метод і синтезовану структуру вимірювача з компенсацією частотних похибок від завад. Наведено результати обчислювальних експериментів з моделями структур.

There are represented synthesized hierarchical structure for computer simulation of magnetic induction meters with automatic correction of offset voltage and sensitivity drift. There are described the method and a modeling structure for the frequency errors compensation from the noise. The results of numerical experiments with models of the structures also are represented.

Існують концепції діагностики і моніторингу електроенергетичного устаткування, які побудовані на одночасній реєстрації декількох характеристик спостережуваного процесу, що мають різну фізичну природу. У їх числі також використовуються і характеристики магнітних полів, взаємодія яких лежить в основі перетворення енергій, здійснюваних в електричних машинах різного призначення [1].

Магнітовимірювальні пристрої у складі систем діагностики і моніторингу, їхні частотні і точнісні параметри повинні відповідати заданим характеристикам системи загалом. Структурний і схемотехнічний синтез складних вимірювальних пристроїв з прогнозованими параметрами неможливо реалізувати без використання комп'ютерного моделювання на етапі їх проектування. Тому розробка методів і засобів підвищення точності вимірювання магнітної індукції одночасно із створенням їх моделей для проведення обчислювальних експериментів видається актуальним завданням, що має практичне значення.

Загальноприйнятим середовищем і стандартом для комп'ютерного структурного і схематехнічного моделювання електронних систем і пристроїв є SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) [2], що відрізняється винятковою універсальністю і гнучкістю. Це справедливо і стосовно досліджень в цьому середовищі магнітовимірювальних систем. Інтенсивні розробки магнітовимірювальних пристроїв різного призначення, які нерідко спрямовані на створення таких пристроїв в інтегральному виконанні [3], містять, як правило, етапи з розробки структур вимірювачів, а іноді і моделей первинних вимірювальних перетворювачів [4]. Проте, варто зазначити недостатність відомостей стосовно початкового етапу дослідження і проектування магнітовимірювальних систем за допомогою комп'ютерних технологій – створення моделюючих структур, які реалізують відомі або нові принципи і методи. Цьому завданню присвячена ця стаття.

Під час структурних досліджень і подальшого моделювання схематехніки магнітовимірювальних систем з давачами Хола вибір моделі самого первинного перетворювача має визначальне значення. У пропонуваніх в статті дослідженнях використовувалися моделі, побудовані на основі еквівалентних схем, що містять з'єднання чотириполюсника з гіраторами [6].

Серед характеристик гальваномагнітних перетворювачів на основі ефекту Хола, вимірювачів магнітної індукції, що безпосередньо впливають на точність, з їх використанням виділимо залишкову напругу і нестабільність чутливості [7], які визначають аддитивну і мультиплікативну похибки вимірювача загалом. Розглянемо структурні методи автоматичної корекції або компенсації цих похибок в прецизійних вимірювачах індукції постійних і змінних магнітних полів.

Автоматична корекція аддитивної похибки реалізується в численних пристроях, заснованих на принципі почергового підімкнення пар контактів датчика до джерела керуючого струму і, відповідно, почергового використання іншої пари як виводи вимірювального сигналу [3]. Моделююча структура для такого способу корекції аддитивної похибки наведена в [8]. Інша структура (рис. 1), докладний опис якої наведений в [7], реалізує корекцію аддитивної похибки методом частотного розділення сигналів.

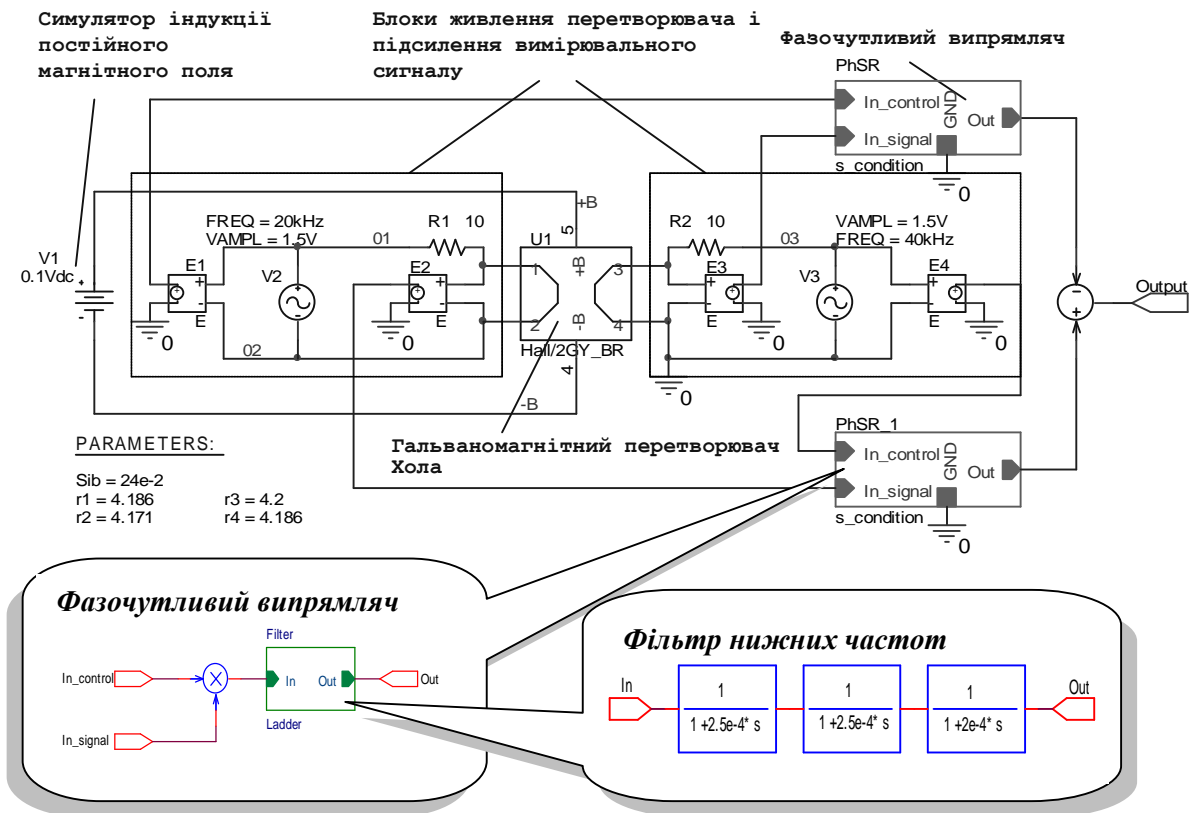


Рис. 1. Структура моделі вимірювача з автоматичною корекцією залишкової напруги

Відзначимо побудову моделюючої структури у вигляді триступінчатої ієрархії. Можна вважати найприйнятнішим саме ієрархічне зображення модульованих структур, оскільки в цьому разі перехід від структурного до схемотехнічного моделювання можна здійснювати поетапним вбудовуванням схемотехнічних рішень в ієрархічні структурні блоки, проведенням експериментів одночасно і зі структурним блоком і з його схемотехнічною реалізацією, заміною структурної одиниці його схемотехнічним блоком. На рис. 2, а наведені перехідні характеристики вимірювача індукції з автоматичною корекцією залишкової напруги перетворювача для різних значень модельованої індукції. Статичні характеристики вимірювача з корекцією аддитивної похибки і самого перетворювача наведені на рис. 2, б.

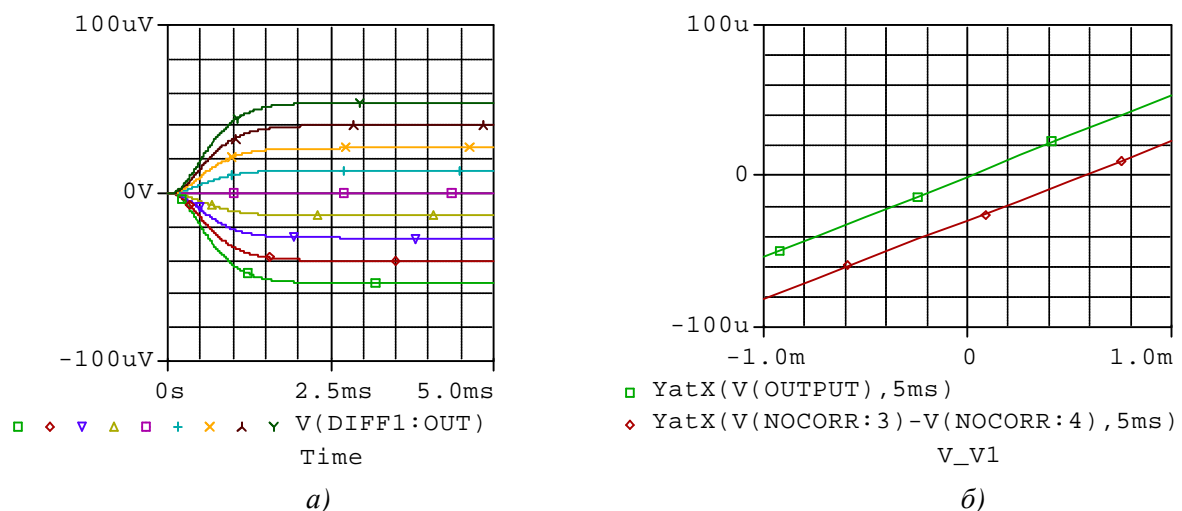


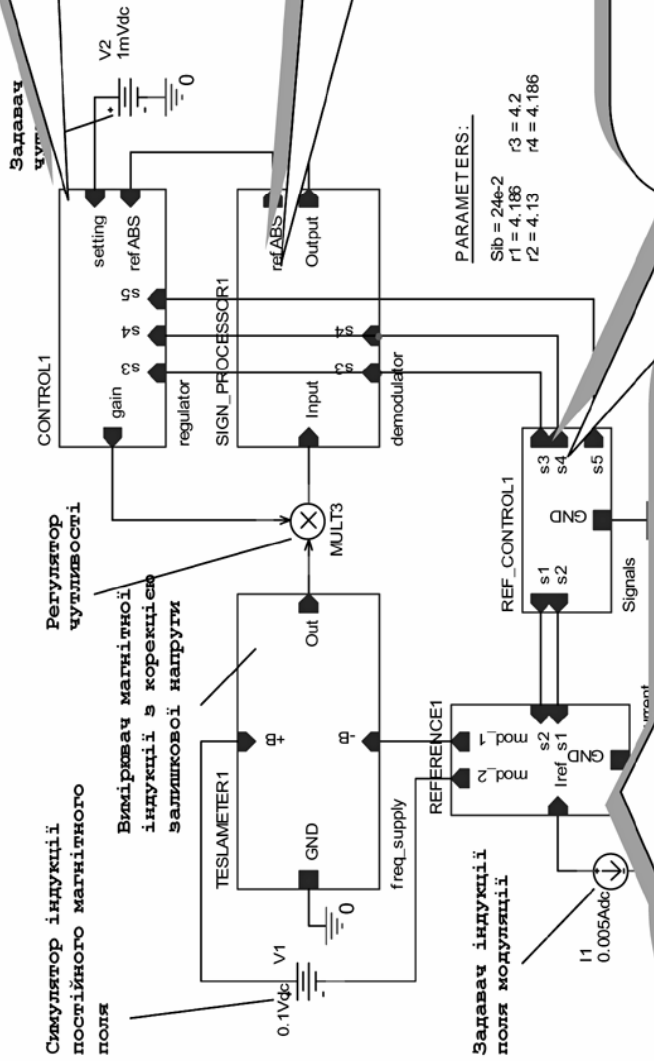
Рис. 2. Перехідна і статична характеристики вимірювача з автоматичною корекцією залишкової напруги

Корекція мультиплікативної похибки, зумовленої зміною чутливості перетворювача, ефективно реалізується у деяких випадках шляхом безперервного калібрування вимірювача за допомогою додаткового модулюючого поля [7, 9]. Перехід до структури вимірювача з корекцією аддитивної похибки і компенсацією мультиплікативної складової похибок здійснюється доповненням описаної вище структури (рис. 3).

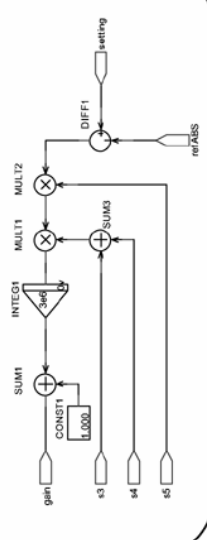
Симулятор модулюючого поля *REFERENCE1* об'єднує стабілізоване джерело струму, утворене задавачем струму живлення котушки збудження модулюючого поля, схемою порівняння *DIFF1*, інтегральним регулятором *INTEG1*, датчиком струму в котушці *H3*, схемою комутації виводів котушки на перемикачах *S1*, *S4*. Вихідним сигналом симулятора є моделююча індукцію модуляції напруга. Сумарний з напругою симуляції індукції постійного магнітного поля від джерела *V1* модульований сигнал надходить на вхід вимірювача магнітної індукції з корекцією залишкової напруги *TESLAMETER1*. Вихідний сигнал вимірювача через регулятор чутливості – множник *MULT3* надходить на блок обробки сигналів *SIGN_PROCESSOR*, який за допомогою пикових детекторів *Sample_hold*, від'ємника *DIFF2*, суматора *SUM2* і обчислювача модуля *ABS1* визначає значення вимірюваної індукції і виділяє амплітудне значення індукції модулюючого поля. Останній порівнюється в блоці управління чутливістю вимірювача *CONTROL1* зі значенням задавача чутливості, стабільне значення якого підтримується інтегральним регулятором, реалізованому елементами цього блока *DIFF1*, *MULT1*, інтегратором *INTEG1*, суматором *SUM1*, задавачем початкового значення чутливості вимірювача *CONST1*. Керуючі сигнали виробляються блоком *REF_CONTROL1*.

Сигнали в ключових точках модулюючої структури (рис. 4, а), перехідні процеси в контурі управління коефіцієнтом передачі тракту вимірювального сигналу і каналу стабілізації амплітуди індукції модулюючого змінного поля вказують на можливість практичної реалізації високоточного пристрою вимірювання індукції постійних або повільнозмінних магнітних полів з малими значеннями двох складових похибки вимірювань.

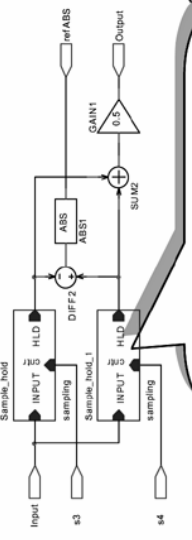
Вимірювач індукції з корекцією і компенсацією похибок



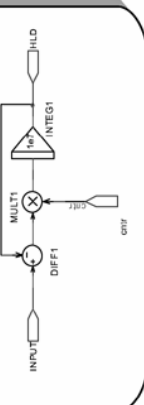
Блок управління чутливістю вимірювача



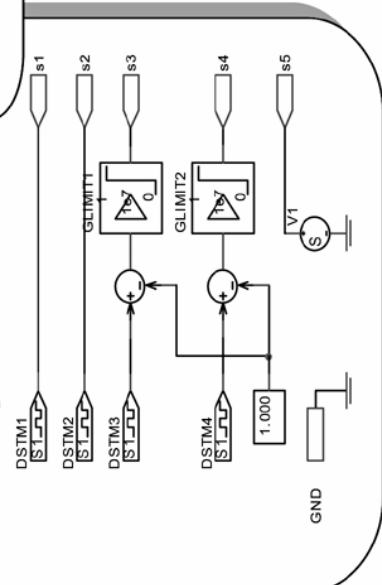
Блок обробки сигналу



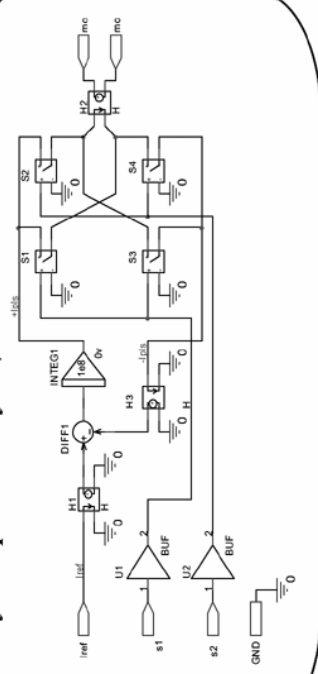
Блок вибірки і зберігання



Блок синхронізації



Симулятор поля модуляції



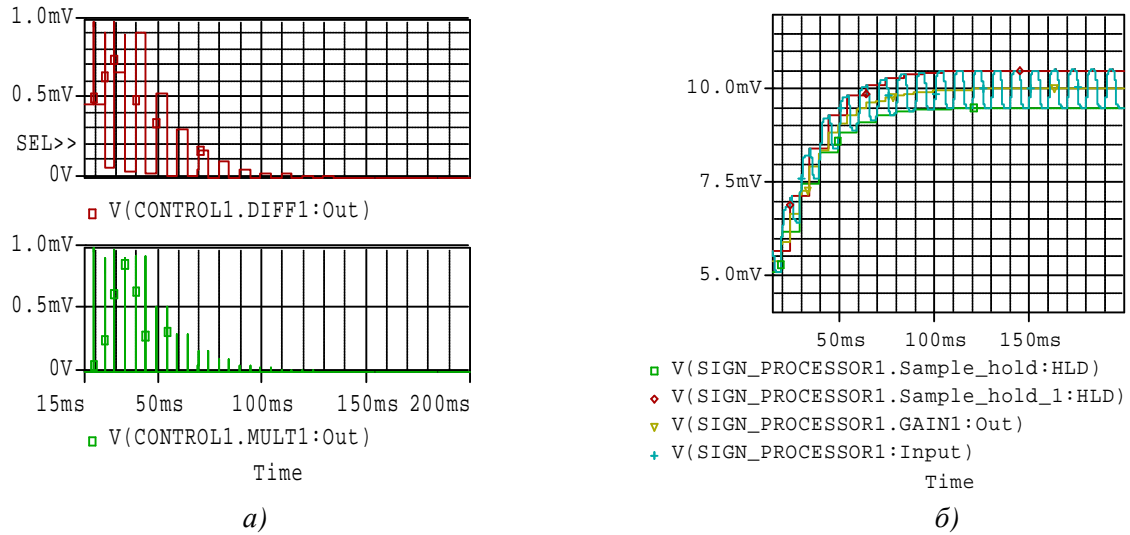


Рис. 4. Керуючі сигнали і перехідні і характеристики вимірювача з автоматичною корекцією адитивної і компенсацією мультиплікативної похибок

На точність вимірювань індукції змінних магнітних полів у деяких випадках може значно впливати наведена на виводи давача Хола ЕРС, величина якої визначається виразом [10]

$$U_{yB} = -\frac{d\Phi}{dt} = -s_h \frac{dB}{dt}, \quad (1)$$

де Φ – магнітний потік, s_h – ефективна площа петлі, утвореної сигнальними виводами датчика. Вплив наведеної ЕРС має виражену частотну залежність, яка для синусоїдального змінного магнітного поля пропорційна його частоті. Запропоновані пасивні методи зниження такого впливу спеціальними способами розташування виводів самого перетворювача або додаванням однієї або декількох спеціальних петель, вихідна напруга яких використовується для компенсації наведеної ЕРС [10]. Запропоновано метод і структуру вимірювачів магнітної індукції з автоматичною компенсацією наведень на виводи вимірювального перетворювача, модель якого наведена на рис. 5.

Тут також передбачається використання спеціальної петлі, вихідний сигнал U_l якої використовується для виділення складової завади, з вимірювального сигналу і її автоматичної компенсації. Для синусоїдальних змінних магнітних полів з частотою ω і амплітудою B_m вимірювальний сигнал на виході перетворювача Хола з наведеною завадою визначиться виразом

$$U_{Bh}(t) = S_{y0}^I \cdot B_m \sin(\omega t) + s_h \cdot \frac{d}{dt}(B_m \sin(\omega t)) = B_m \cdot \left(S_{y0}^I \cdot \sin(\omega t) + s_h \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \right), \quad (2)$$

де $S_{y0}^I = \frac{V_H}{B \cdot I_c}$ – статична питома чутливість перетворювача Хола [7], I_c – керуючий струм, V_H – напруга Хола.

Вихідний сигнал U_l вимірювальної петлі для тих самих умов можна записати у вигляді

$$U_{Bl}(t) = s_l \cdot B_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega t), \quad (3)$$

де s_l – ефективна площа вимірювальної петлі. Використовуючи цю напругу з деяким множником помилку компенсації можна записати так:

$$e(t) = U_{Bh}(t) - k_{comp} U_{Bl}(t) = B_m^2 \cdot \left(S_{y0}^I \cdot \sin(\omega t) + s_h \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \right) - k_{comp} \cdot s_l \cdot B_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega t). \quad (4)$$

Для оцінки поточного рівня складової завади у вимірювальному сигналі скористаємося фазочутливим випрямлячем на основі синхронного детектора (СД) [11]. На виході перемножника СД отримаємо сигнал

$$U_{mlt}(t) = e(t) \cdot U_{Bl}(t) = B_m^2 \cdot \omega^2 \cdot \left[\left(\frac{s_h}{s_l} - k_{comp} \right) \cdot s_l^2 \cdot \cos^2(\omega t) + \frac{S_{y0}^I}{2 \cdot \omega} \cdot \sin(2\omega t) \right]. \quad (5)$$

Вимірювач магнітної індукції з компенсацією напруги завади

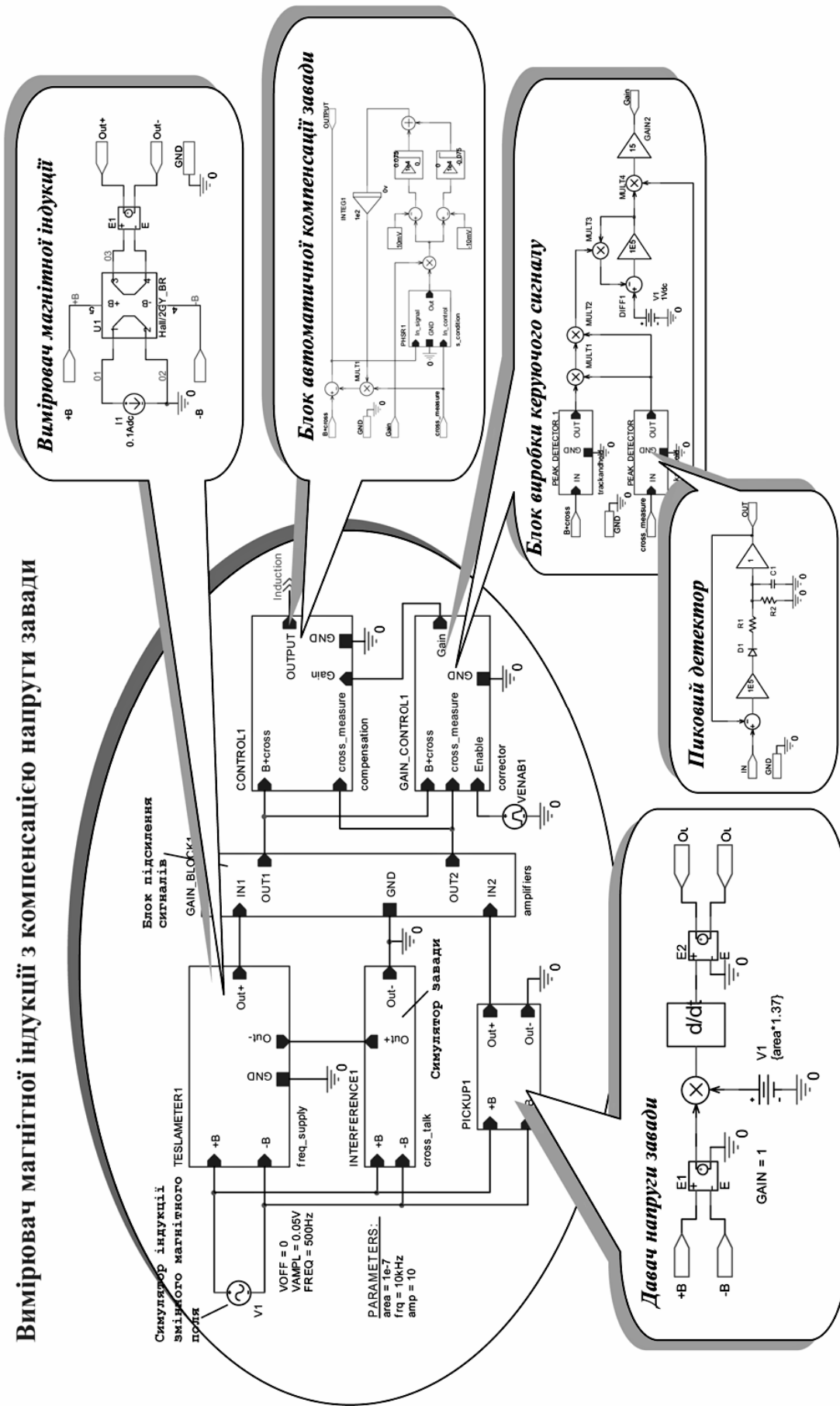


Рис. 5. Моделююча структура вимірювача магнітної індукції з компенсацією напруги завади

Відзначимо, що і після фільтрації вихідного сигналу перемножника, коли буде ослаблена друга гармонійна складова, оцінка поточного рівня завади залежатиме від частоти змінного магнітного поля. Ця залежність може бути послаблена, але не виключена повністю так, як це показано в ієрархічному блоці вироблення керуючого сигналу (рис. 5). Пропорційне управління коефіцієнтом компенсації в широкому діапазоні частот утруднене, тому в ієрархічному блоці компенсації перешкоди реалізований релейний регулятор із зоною нечутливості в області нульового значення заданого сигналу з виходу СД. Перехідний процес для сигналів основних вузлів структури показаний на рис. 6.

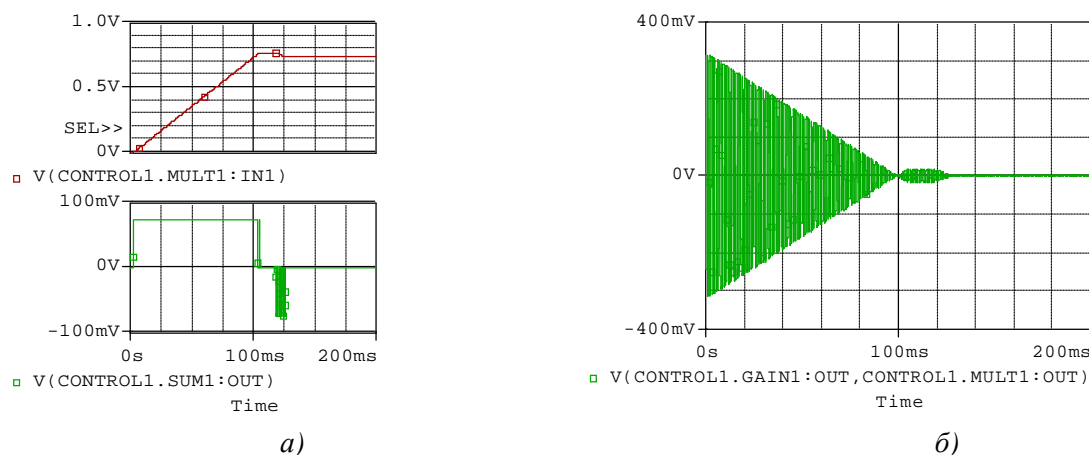


Рис. 6. Керуючі сигнали та перехідні і характеристики вимірювача з автоматичною компенсацією напруги завод

Ієрархічні блоки *INTERFERENCE1* і *PICUP1* симулюють складову завади і сигнал вимірювальної петлі, прямо реалізують залежність (1) з відповідними коефіцієнтами. Власне вимірювач індукції *TESLAMETER1* об'єднує макромодель давача *U1*, джерело струму *I1* і підсилювач керуючої напруги *E1* з параметром $GAIN = 1$.

Отже, основні результати описаних в статті розробок і експериментальних досліджень можна сформулювати так:

1. Розроблені моделюючі структури прецизійних вимірювачів магнітної індукції, які можна використати для створення пристроїв з прогнозованими характеристиками для моніторингу і діагностики електроенергетичного устаткування.
2. Запропонований метод і синтезована моделююча структура для автоматичної компенсації напруги наведення на виводи гальваноманітного перетворювача. Наведені результати можуть знайти застосування під час вимірювань в умовах підвищеного рівня завод, наприклад, під час вимірювань магнітної індукції в зазорах електричних машин.
3. Ієрархічна організація модельованих структур є ефективною для подальшого схемотехнічного моделювання і є надійною алгоритмічною основою для розроблення і налагодження засобами SPICE програмного забезпечення вбудованих обчислювальних пристроїв.

1. Penrose, Howard W. Ph.D. *Electric Motor Diagnostics*. MARTS 2004 Proceedings, May, 2004.
 2. Раевич В.Д. Система проектирования OrCAD 9.2 – М.: Солон-Пресс, 2004. 3. Bilotti A., Monreal G., Vig R. Monolithic magnetic Hall sensor using dynamic quadrature offset cancellation // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 32, No. 6, June 1997. 4. Portmann L. Termis hall plate. Technical report, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 2001. 6. Таранов С.Г., Мазманян Р.О. Гиратор в SPICE-моделях гальваноманітних преобразователів Холла // *Технічна електродинаміка*. – 2008. – № 1. 7. Гальваноманітні преобразователі в измерительной технике / В.В. Брайко и др.; Под ред. С.Г. Таранова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. 8. Мазманян Р.О. Структурное моделирование измерителей магнитной индукции с коммутируемыми выводами датчика Холла // *Технічна електро-*

динаміка. – 2007. – № 1. 9. Simon P. L. C. de Vries P. H. S., Middelhoek S. Autocalibration of Silicon Hall Devices // IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Vol. 2, P. 237–240, June 1995. 10. Кобус А., Тушинский Я. Датчики Холла и магниторезисторы / Пер. с польск. – М.: Энергия, 1971. 11. Дехтяренко П.И. Синхронное детектирование в измерительной технике и автоматике. – К.: Техніка, 1965.

УДК 621.311.2

А.А. Мельник

Донецький національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ІЗ НЕРІВНОМІРНИМ РУХОМ

О Мельник А.А., 2009

Показана побудова математичної моделі та виконано моделювання робочих процесів в електромеханічній системі із нерівномірним рухом, змінними моментами інерції та сил опору на прикладі кантувача маніпулятора.

Construction of the combined mathematical model is shown and modelling of working processes in electromechanical system of the manipulator which is difficult system with non-uniform movement is executed.

Постановка проблеми. Протягом останніх десяти років, коли на лінії стану “900” ЗАТ “ММЗ “ІСТІЛ” активно почали виробляти сортамент “коло 80”, з’явилися проблеми, пов’язані із різким збільшенням кількості вмикань приводного двигуна кантувача маніпулятора. Кількість вмикань досягала 800–1000, що в кілька разів перевищувало допустиму норму для двигунів краново-металургійної серії МТКФ (МТКН) [1]. Термін експлуатації такого двигуна не перевищував 1,5–2 місяці. Причому вихід двигуна із ладу був можливий під час технологічного процесу прокатки, а спричиняє зупинку усіх ланок технологічного ланцюга. Час заміни зіпсованого двигуна може дорівнювати двом – двом з половиною годинам. Виникає потреба дослідити реальне завантаження двигуна у різні періоди року, та мати можливість враховувати вплив температури навколишнього середовища, кількість вмикань підряд та вплив характеру навантаження без втручання у технологічний цикл цеху. З іншого боку, оцінці підлягає діюча система електроприводу та можливість її заміни на універсальнішу, яка забезпечуватиме нормальне функціонування електромеханічної системи кантувача при різних видах сортаменту.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Удосконалення сучасного парку обчислювальної техніки, нестримне зростання обчислювальних потужностей персональних комп’ютерів дозволяє створювати вдосконалені моделі електромеханічних об’єктів, відмовлятися від припущень, які істотно знижують точність чисельних розрахунків на моделі. Математичні моделі процесів перетворення енергії розглядалися взагалі за ознакою чи вони є тепловими, електромагнітними чи електромеханічними. У роботах [2, 3, 4 та ін.] створено та розвинуто методики розрахунку теплових процесів, які супроводжують електромеханічне перетворення енергії, в роботах [5, 6, 7 та ін.] вдосконалюються методики досліджень електромагнітних процесів у електромеханічних перетворювачах енергії. Електромеханічні системи із поглибленим розгляданням процесів у механічній частині наведено у [8, 9 та ін.].

Задача досліджень. Виконаний аналіз вказує на можливість розроблення суміщеної математичної моделі механізму кантувача, яка поєднуватиме рівняння рівноваги електромагнітних