ЕЛЕКТРОНІКА, РАДІОТЕХНІКА ТА ЗАСОБИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 621.317.365

Вал.С. Вунтесмері, А.І. Витяганець

НИЗЬКОЧАСТОТНЕ РОЗШИРЕННЯ ДІАПАЗОНУ РОБОТИ МАГНІТОРЕЗИСТИВНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СЕРЕДНІХ ЧАСТОТ

Вступ

Однією з важливих енергетичних характеристик, яка вимірюється в електричних колах, є активна потужність. За принципом роботи датчика засоби вимірювання активної потужності на низьких і середніх частотах можна класифікувати в такий спосіб: помножувачі миттєвих значень напруг і струмів з наступним усередненням, електродинамічні і феродинамічні ватметри, ватметри з перетворювачами Холла та магніторезистивні вимірювальні перетворювачі [1].

Найперспективнішими засобами вимірювання активної потужності є магніторезистивні перетворювачі, в яких перетворення енергії електромагнітного поля відбувається на основі використання гальваномагнітних явищ (аномального ефекту Холла і магнітоопору) у тонких магнітних плівках. Основними перевагами таких перетворювачів порівняно з напівпровідниковими і феритовими є невелика похибка вимірювання, менше значення термоелектрорушійної сили і менший вплив випрямляючих контактів.

Вихідний сигнал магніторезистивного перетворювача пропорційний добутку електричної і магнітної складових поля із врахуванням зсуву фаз між ними. Це дає змогу використовувати такі перетворювачі для вимірювання активної потужності незалежно від фазових співвідношень у лінії передачі з неузгодженим навантаженням [2].

При роботі перетворювача в реальному середовищі, крім магнітного поля, створюваного провідником із струмом, існують зовнішні магнітні поля споживачів струму. Тому захист перетворювача від впливу зовнішніх магнітних полів є актуальним. Крім того, на низьких частотах виникає потреба у великих номіналах блокувальних і роздільних ємностях, які підвищують масогабаритні характеристики перетворювача.

Постановка задачі

Метою даної статті є пошук можливостей зняття обмежень на частоту вимірювального сигналу в область низьких частот за рахунок інвертування сигналу з високою частотою, що зробить перетворювач компактнішим внаслідок зменшення ємностей.

Принцип роботи магніторезистивного перетворювача

Основою перетворювача є плівка магніторезистивного 80Ni20Fe-сплаву. Запропонована структура перетворювача має вигляд, показаний на рис. 1, і складається з двох ортогональних гілок, елементи яких з'єднані послідовно.

У перетворювача є два незалежні входи: електричний, який пов'язаний із напругою, прикладеною до перетворювача, і магнітний, пов'язаний з магнітним полем лінії передачі або із струмом, що протікає в схемі. Сигнал параметричного множення U_0 знімається з магніторезистора. При створенні ватметра плівку підключають до електричної мережі і розміщують у магнітному полі провідника із струмом [2].

Для магніторезистивного перетворювача електрорушійна сила, крім корисного сигналу e_0, визначається і паразитними електрорушійними силами квадратичних складових магнітного поля e_{h^2} і напруги e_{V^2} та термоелектрорушійною силою самого перетворювача $e_{\text{термоЕРС}}$:

$$e = e_0 + e_{h^2} + e_{V^2} + e_{\text{термоЕРС}}. \qquad (1)$$

Для низької частоти і геометричного відношення між векторами, як показано на рис. 1, сигнал U_0 пов'язаний з комплексними амплітудами вхідних змінних сигналів V, h і з активною потужністю в лінії передачі за формулою

$$U_0 = \frac{\Delta\rho}{\rho}\frac{1}{H_0}\mathrm{Re}(V h^*) = \mathrm{Re}(k_V k_I^* U I^*) =$$

$$= k_P U I \cos(\varphi_U - \varphi_I), \text{ якщо } k_V, k_I^* \in \mathrm{Re}, \qquad (2)$$

де $\Delta\rho/\rho$ – анізотропія магнітоопору матеріалу магніторезистора; H_0 – інтенсивність магнітного поля зміщення; k_V – комплексний коефіцієнт пропорційності між напругою в лінії передачі U і вхідною напругою на перетворювачі V; k_I – комплексний коефіцієнт пропорційності між струмом у лінії передачі I і магнітним полем h; k_P – коефіцієнт перетворення магніторезистивного перетворювача.

Подільник напруги $R_8, R_9, C_1{-}C_3$ створює необхідне амплітудно-фазове співвідношення між струмом у магніторезистивному перетворювачі і інвертованою напругою схеми змінного струму. Вихід перетворювача з'єднаний із нановольтметром через низькочастотний фільтр R_{10}, R_{11}, C_6, C_7. На виході перетворювача знімаємо постійну напругу, пропорційну активній потужності в лінії передачі.

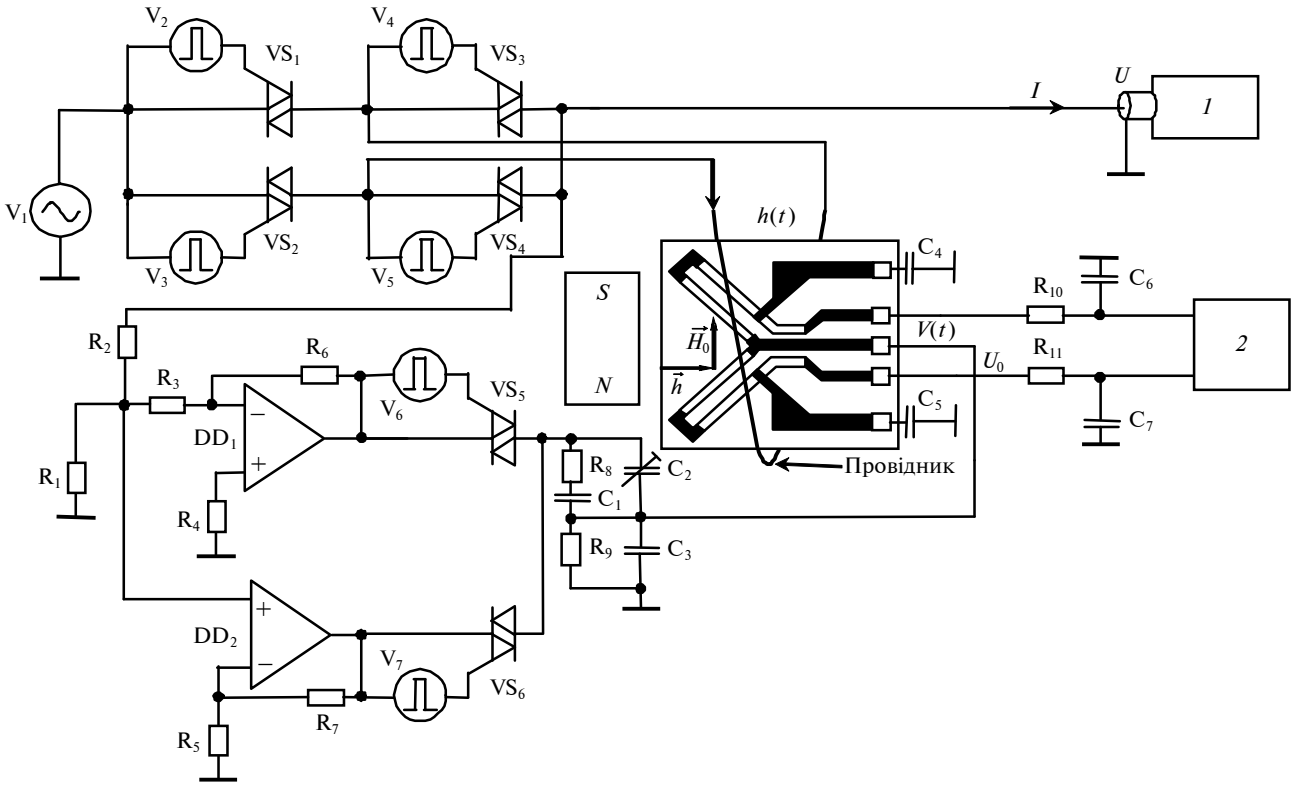

Рис. 1. Схема вимірювання магніторезистивного перетворювача: *1* – калориметрична голівка вимірювача потужності; *2* – нановольтметр

Інвертування сигналів на електричному вході перетворювача

Для зменшення ємностей при роботі на низьких частотах (зокрема, на постійному струмі), потрібно розширити спектр вхідного сигналу за напругою, подавши його через ключ, що інвертує напругу і працює на частотах, на кілька порядків вищих від частоти вимірюваного сигналу.

Комутатор напруги (див. рис. 1) складається з операційних підсилювачів, виконаних на елементах R_3–R_7, DD_1, DD_2, та двох паралельно ввімкнених симисторів VS_5 і VS_6, які керуються джерелами імпульсів змінної полярності V_6 і V_7, що працюють синхронно з джерелами комутатора струму V_2, V_5 (рис. 2, *а*).

Основними перевагами перемикачів на симисторах є їх велика швидкодія, здатність блокувати і пропускати струми будь-якої полярності, здатність до самозахисту від нестаціонарних перенапруг, коли симистор перемикається в стан провідності.

Симистор перемикається із замкненого стану в провідний керуючим сигналом, який подається в коло керуючого електрода відносно анода. Для вимкнення симистора необхідно знизити анодний струм до величини, меншої струму утримання. Це досягається зміною полярності анодної напруги.

При напрузі в лінії інвертований сигнал на електричному вході перетворювача (рис. 2, *б*) становить

$$V(t) = \sum_{n=1,\,3,\,\ldots}^{\infty} k_V(n\omega_0 \pm \Omega) U \sin(\Omega t + \varphi_U) \times$$

$$\times \operatorname{sign}(\sin(\omega_0 t + \varphi)), \qquad (3)$$

де U – амплітуда напруги в лінії передачі; ω_0, φ – частота і фаза інвертуючого високочастотного коливання; Ω, φ_U – частота і фаза низькочастотного коливання; $k_V(n\omega_0 \pm \Omega)$ – комплексний коефіцієнт передачі напруги для бокових частот.

Інвертування сигналів на магнітному вході перетворювача

Комутація напруги і струму, який протікає в навантаженні, незалежно від полярності дає змогу захистити схему від впливу зовнішнього магнітного поля. За рахунок інвертування сигналів магнітний вплив буде повністю знівельований, оскільки перетворювач працюватиме як детектор високочастотного сигналу, а не як низькочастотного. Цю проблему можна вирішити за допомогою схеми з мостовим увімкненням симисторів VS_2–VS_5 (див. рис. 1).

Перемикання симисторів відбувається за допомогою джерел імпульсів змінної полярності V_2–V_5 в моменти переходу імпульсу через нульове значення. Час вимкнення симистора залежить від імпульсу безпосередньо перед початком вимкнення, характеру навантаження його анодного кола, а також крутизни переходу імпульсу через нульове значення.

Головною особливістю запропонованої мостової схеми на симисторах (див. рис. 1) є те, що струм у навантаженні практично не змінюється, симисторний ключ увесь час увімкнений, і струм змінює свою фазу (інвертується) лише в провіднику (рис. 2, *в*).

Генератори V_3 і V_4 формують періодичну послідовність імпульсів, повернутих на 180° відносно імпульсів, які формуються генераторами V_2 і V_5. Моделювання комутаторів струму і напруги виконувалось у програмі Micro-CAP, де як симистори використовувались тріаки 2N5567 (Motorola).

Інвертований струм на магнітному вході перетворювача має вигляд

$$h(t) = \sum_{n=1,\,3,\,\ldots}^{\infty} k_I(n\omega_0 \pm \Omega) \times$$

$$\times I\sin(\Omega t + \varphi_I)\operatorname{sign}(\sin(\omega_0 t + \varphi)), \qquad (4)$$

де I – амплітуда струму в лінії передачі; ω_0, φ – частота і фаза інвертуючого високочастотного коливання; Ω, φ_I – частота і фаза низькочастотного коливання; $k_I(n\omega_0 \pm \Omega)$ – комплексний коефіцієнт передачі по магнітному полю для бокових частот.

Вихідний сигнал магніторезистивного перетворювача

Вхідні сигнали, які подаються на магніторезистивний перетворювач, мають тільки дві бокові частоти без центральної, тобто перетворювач працює як балансний змішувач. Оскільки $\Omega \ll \omega_0$, при застосуванні усереднення в лінійному наближенні для бокових частот приймемо, що комплексні коефіцієнти передачі належать до інвертуючого сигналу відносно кожної гармоніки.

Сталу складову отримуємо, інтегруючи по періоду низькочастотного сигналу, добуток:

$$U_0 = \frac{1}{T}\int_0^T V(t)h(t)dt\,. \qquad (5)$$

Вклад у сталу складову дає тільки квадрат кожної спектральної складової. Після підстановки (3) і (4) в (5), врахувавши усереднення, а та-

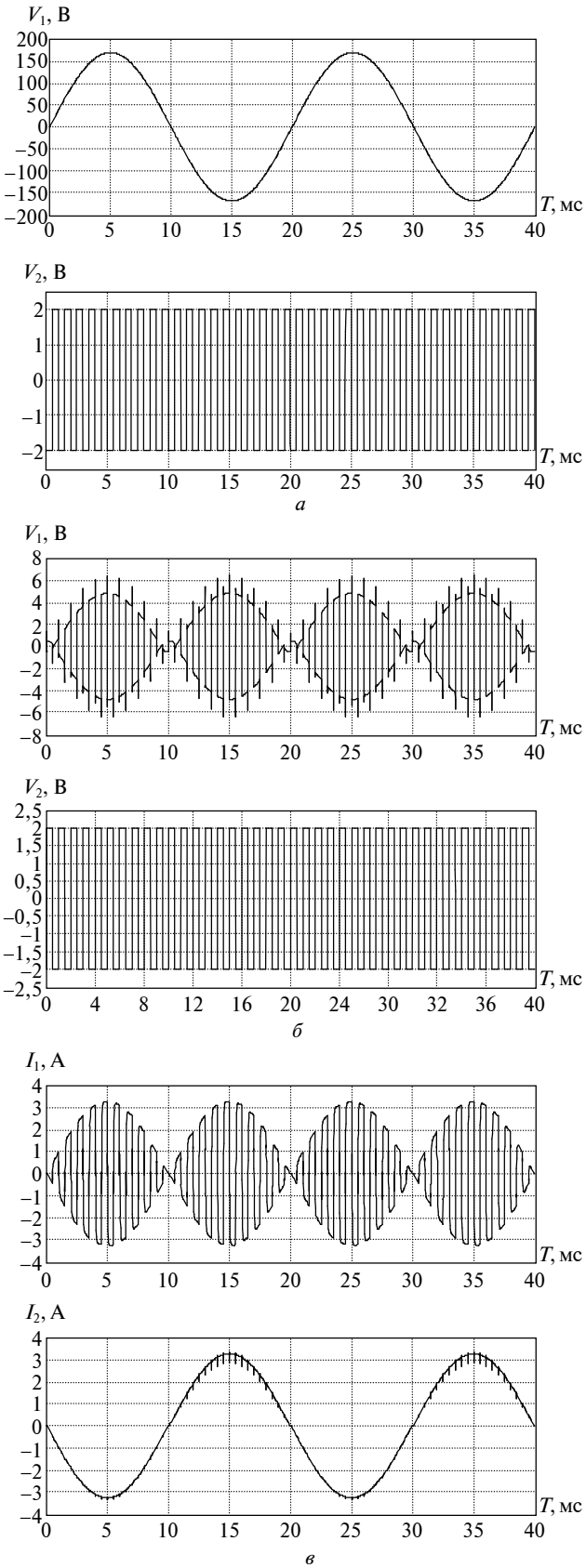

Рис. 2. Осцилограми напруг і струмів

кож те, що $(1 \cdot \mathrm{sign}(\sin(\omega_0 t + \varphi)))^2 = 1$, для сталої складової отримаємо

$$U_0 = k_p U I \cos(\varphi_U - \varphi_I), \qquad (6)$$

де

$$k_p = \frac{\Delta\rho}{\rho}\frac{1}{H_0}\sum_{n=1,3,\ldots}^{\infty}\frac{1}{n^2}|k_V(n\omega_0)||k_I(n\omega_0)| \times$$

$$\times \cos(\varphi_{k_V(n\omega_0)} - \varphi_{k_I(n\omega_0)})$$

є дійсним коефіцієнтом перетворення, який являє собою сталу величину для заданого інвертуючого сигналу та подільника напруги.

В результаті інтегрування залишиться складова, яка залежатиме тільки від зсуву фаз між струмом і напругою в лінії передачі та визначатиме активну потужність у навантаженні. Із зростанням частоти гармоніки амплітудно-фазове співвідношення перетворювача змінюється [3]. Тому наступним кроком буде проведення оптимізації частотної характеристики подільника напруги для отримання максимальної величини коефіцієнта перетворення.

Отже, перетворювач працює як параметричний детектор, вихідний сигнал якого пропорційний активній потужності.

Висновки

Інвертування напруги і струму з високою частотою порівняно із сигналом, потужність якого вимірюється, дає можливість використовувати подільник напруги на високій частоті проінвертованого сигналу, що значно простіше і потребує значно менших номіналів ємностей. Це знімає обмеження на частоту сигналу, що вимірюється, в область низьких частот, включаючи постійний струм.

У статті отримано співвідношення між активною потужністю і вихідним сигналом перетворювача через амплітудно-фазове співвідношення комплексних коефіцієнтів передачі напруги і магнітного поля.

Основними напрямками подальших досліджень магніторезистивних перетворювачів будуть дослідження перетворювача при вимірюванні різних співвідношень гармонік вхідного сигналу, частотної характеристики перетворювача при різних підмагнічуючих полях та реакція перетворювача на комплексне навантаження.

Вал.С. Вунтесмери, А.И. Вытяганец

НИЗКОЧАСТОТНОЕ РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА РАБОТЫ МАГНИТОРЕЗИСТИВНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СРЕДНИХ ЧАСТОТ

Показано, что постоянная составляющая продетектированого магниторезистивным преобразователем сигнала пропорциональна активной мощности в линии передачи. Исследованы модели коммутаторов тока и напряжения на симисторах.

Val.S. Vountesmeri, A.I. Vytiaganets

LOW FREQUENCY RANGE WORK EXPANSION OF MAGNETORESISTIVE MEASURING CONVERTER OF ACTIVE POWER OF MIDDLE FREQUENCIES

This paper illustrates that the dc voltage on the output of the magnetoresistive measurement converter is proportional to active power in a transmission line. Furthermore, we study the inversion switchboards models of current and voltage based on triacs.

1. *Вунтесмері Вал.С.*, *Витяганець А.І.* Засоби вимірювання активної потужності на низьких і середніх частотах "*IN SITU*" // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2007. – № 34. – С. 112–118.

2. *Vountesmeri V.* Magnetoresistive multipliers as a new base for watt-converters // IEEE. Transactions on instrumentation and measurement. – 1998. – N 5. – P. 1395–1398.

3. *Вунтесмери Вал.С.*, *Вытяганец А.И.* Исследование частотной характеристики магниторезистивного измерительного преобразователя активной мощности низких частот // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2007. – № 12. – С. 45–48. Переклад: *Vountesmeri V.S.*, *Vytyaganets A.I.* Frequency response investigation of magnetoresistive low frequency active power measuring transducer // Radioelectronics and Communications Systems. – 2007. – **50**, N 12. – P. 680–682 (USA).

Рекомендована Радою радіотехнічного факультету НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
12 березня 2008 року