

Міністерство освіти і науки України
Кременчуцький державний політехнічний університет

**ВІСНИК
КРЕМЕНЧУЦЬКОГО ДЕРЖАВНОГО
ПОЛІТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

**Наукові праці
Кременчуцького державного політехнічного університету**

Випуск 2/2001 (11)

Кременчук 2001

Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету:
Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2001. – Вип. 2(11). – 512 с.

Наукове видання, публікації в якому визначаються при захисті дисертаційних робіт з
технічних наук (постанова президії ВАК України від 9.06.1999 року № 1-05/7).

Збірник публікує статті, які містять нові теоретичні та практичні результати в галузях
технічних, природничих та гуманітарних наук.
The transactions represent the articles, which contain new theoretical and practical results in the
field of technical, natural and humanitarian sciences.

Редакційна рада:

Луговой А.В., к.т.н., професор, проректор з НДР (голова); Капустян Г.Т., к.і.н., професор
(відповідальний секретар); Андрусенко О.М., д.т.н., професор (заст.голови); Артамонов В.В.,
д.т.н., професор (заст.голови); Венцель Є.С, д.т.н., професор; Воробйов В.В., д.т.н., професор
(заст.голови); Воробйов В.Д., д.т.н.; Гриценко А.В., д.т.н., професор; Доценко П.Д., д.т.н.,
професор; Єлізаров О.І., д.ф.-м.н., професор; Ємельянова І.А., д.т.н., професор; Єфремов
Е.І., д.т.н. член-кор. НАН України; Клепиков В.Б., д.т.н., професор; Комір В.М., д.т.н.,
професор; Кошарний М.Ф., д.т.н., професор; Маслов О.Г., д.т.н., професор; Назаров Л.В.,
д.т.н., професор; Некос В.Ю., д.г.н., професор; Нічке В.В., д.т.н., професор; Оніщенко О.Г.,
д.т.н., професор; Осташко О.І., к.і.н., професор (заст.голови); Пирогов Л.І., к.т.н., професор
(заст.голови); Праховник А.В., д.т.н., професор; Родькін Д.Й., д.т.н., професор (заст.голови);
Садовой О.В., д.т.н., професор; Сафаров Т.А., д.г.-м.н., професор; Сахно В.П., д.т.н.,
професор; Солтус А.П., д.т.н., професор (заст.голови); Стенін О.А., д.т.н., професор;
Хоменко М.М., д.е.н., професор (заст.голови); Шаблій В.П., д.т.н., професор (заст.голови);
Шмандій В.М., к.ф.-м.н., професор; Юрко О.А., д.т.н., професор.

АМПЛИТУДНО – ФАЗОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИСОКОЧАСТОТНИХ РЕЗОНАНСНИХ КОНТУРІВ

Рудик А.В., Возняк О.М., Барановський І.В.
Вінницький державний технічний університет

При вимірюванні основних параметрів резонансних контурів (послідовних та паралельних), таких як резонансна частота, добротність, характеристичний опір, смуга пропускання і т.і., виникають значні труднощі. Проведений аналіз методів вимірювання основних параметрів резонансних контурів (наприклад, за величиною добротності) показав, що відомі методи (резонансні, мостові і т.і.) мають значну похибкою і не дозволяють в достатній мірі автоматизувати процес вимірювання. Тому постає задача розробки нових методів вимірювання параметрів резонансних контурів.

В роботі розглядається амплітудно-фазовий метод вимірювання основних параметрів резонансних контурів (послідовних та паралельних), а також його схемна реалізація.

Одним з основних параметрів будь-якого резонансного контуру є його добротність, яка в свою чергу зв'язана зі смугою пропускання, характеристичним опором, еквівалентним резонансним опором і т.і. Як відомо, добротність резонансного контуру є відношенням характеристичного опору ρ до опору

$$\text{втрата } r_K, \text{ тобто } Q = \frac{\rho}{r_K}.$$

Для реалізації амплітудно-фазового методу вимірювання параметрів резонансних контурів необхідно забезпечити вимірювання фазового зсуву між двома електричними напругами – на деякому зразковому елементі та власне резонансному контурі, вимірювання частоти цих напруг, а також вимірювання відношення амплітуд цих напруг.

Однак при вимірюванні параметрів високочастотних резонансних контурів резонансна частота може бути дуже великою, що потребує наявності широкодіапазонного генератора електричних коливань. Тому при реалізації амплітудно-фазового методу вимірювання параметрів високочастотних резонансних

контурів пропонується штучно зменшувати резонансну частоту контуру – для паралельного резонансного контуру підключенням паралельно до контуру зразкового ємнісного елемента, а для послідовного резонансного контуру підключенням послідовно до контуру зразкового індуктивного елемента. При цьому параметри зразкових елементів відомі.

Проаналізуємо наявність взаємозв'язку між основними параметрами резонансних контурів та фазовим зсувом і відношенням амплітуд напруг на зразковому елементі та резонансному контурі. Розглянемо окремо вимірювання основних параметрів послідовних та паралельних резонансних контурів.

Для розв'язання поставленої задачі при вимірюванні основних параметрів паралельних резонансних контурів пропонується використовувати вимірювальний перетворювач (рис.1, а), до складу якого входять зразковий резистор R_0 , власне паралельний резонансний контур, де L , C та $r_K = r_L + r_C$ – відповідно індуктивність, ємність та активний опір резонансного контуру, а також зразковий конденсатор з ємністю C_0 та активним опором втрат r_{C_0} .

Однак для спрощення аналізу введемо позначення (рис.1, б), які характерні для зведення двох ємностей з втратами, включеними паралельно, до однієї еквівалентної ємності з втратами:

$$C_{\text{екв}} = C + C_0; \quad (1)$$

$$r_{C_{\text{екв}}} = \frac{r_C C + r_{C_0} C_0}{C + C_0}. \quad (2)$$

Проаналізувавши еквівалентну схему вимірювального перетворювача (рис.1, б), знайдемо комплексні напруги \dot{U}_1 та \dot{U}_2 :

$$\dot{U}_1 = \frac{\ddot{U}_{\text{вх}} R_0}{R_0 + Z_{K1\text{екв}}} = \frac{U_{\text{вх}} R_0 \sqrt{1 + Q_{\text{екв}}^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{0\text{екв}}} - \frac{\omega_{0\text{екв}}}{\omega} \right)^2}}{\sqrt{(R_0 + \rho_{\text{екв}} Q_{\text{екв}})^2 + R_0^2 Q_{\text{екв}}^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{0\text{екв}}} - \frac{\omega_{0\text{екв}}}{\omega} \right)^2}} \times \quad (3)$$

$$\times e^{j \left\{ \varphi_{\text{вх}} + \arctg Q_{\text{екв}} \left(\frac{\omega}{\omega_{0\text{екв}}} - \frac{\omega_{0\text{екв}}}{\omega} \right) - \arctg \frac{R_0 Q_{\text{екв}} \left(\frac{\omega}{\omega_{0\text{екв}}} - \frac{\omega_{0\text{екв}}}{\omega} \right)}{R_0 + \rho_{\text{екв}} Q_{\text{екв}}} \right\}};$$

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_{вх} \dot{Z}_{Кл\text{екв}}}{R_0 + \dot{Z}_{Кл\text{екв}}} = \frac{U_{вх} \rho_{\text{екв}} Q_{\text{екв}}}{\sqrt{(R_0 + \rho_{\text{екв}} Q_{\text{екв}})^2 + R_0^2 Q_{\text{екв}}^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{0\text{екв}}} - \frac{\omega_{0\text{екв}}}{\omega} \right)^2}} \times j \left\{ \varphi_{вх} - \arctg \frac{R_0 Q_{\text{екв}} \left(\frac{\omega}{\omega_{0\text{екв}}} - \frac{\omega_{0\text{екв}}}{\omega} \right)}{R_0 + \rho_{\text{екв}} Q_{\text{екв}}} \right\} \quad (4)$$

де $\dot{Z}_{Кл\text{екв}} = \frac{\rho_{\text{екв}} Q_{\text{екв}}}{1 + j Q_{\text{екв}} \left(\frac{\omega}{\omega_{0\text{екв}}} - \frac{\omega_{0\text{екв}}}{\omega} \right)}$ — комплекс-

ний опір паралельного резонансного контуру;

$$\omega_{0\text{екв}} = \frac{1}{\sqrt{LC_{\text{екв}}}} = \frac{1}{\sqrt{L(C+C_0)}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + \frac{C_0}{C}}} = \omega_0 \sqrt{\frac{C}{C+C_0}} < \omega_0$$

— еквівалентна резонансна частота паралельного резонансного контуру;

$$\rho_{\text{екв}} = \omega_{0\text{екв}} L = \frac{1}{\omega_{0\text{екв}}(C+C_0)} = \sqrt{\frac{L}{C+C_0}}$$

— еквівалентний характеристичний опір резонансного контуру;

$$Q_{\text{екв}} = \frac{\rho_{\text{екв}}}{r_{\text{екв}}}$$

— еквівалентна добротність резонансного контуру;

$$r_{\text{екв}} = r_L + r_{C_{\text{екв}}} = r_L + \frac{r_C C + r_{C_0} C_0}{C + C_0}$$

— еквівалентний опір втрат паралельного резонансного контуру;

$\dot{U}_{вх} = U_{вх} e^{j\varphi_{вх}}$ — вхідна напруга вимірювального перетворювача в комплексній формі.

Фазовий зсув між комплексними напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 дорівнює

$$\varphi_1 = \arg\{\dot{U}_1\} - \arg\{\dot{U}_2\} = \arctg Q_{\text{екв}} \left(\frac{\omega}{\omega_{0\text{екв}}} - \frac{\omega_{0\text{екв}}}{\omega} \right) = \arctg Q_{\text{екв}} \frac{\omega^2 - \omega_{0\text{екв}}^2}{\omega_{0\text{екв}} \omega} \quad (5)$$

а відношення амплітуд комплексних напруг визначається співвідношенням

$$A_1 = \frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_1|} = \frac{\rho_{\text{екв}} Q_{\text{екв}}}{R_0 \sqrt{1 + Q_{\text{екв}}^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{0\text{екв}}} - \frac{\omega_{0\text{екв}}}{\omega} \right)^2}} \quad (6)$$

З співвідношення (5) виходить, що для знаходження добротності резонансного контуру вимірювання необхідно проводити на двох частотах, при цьому частоти ω_1 та ω_2 повинні знаходитись

поблизу резонансної частоти $\omega_{0\text{екв}}$ для забезпечення виконання умови $-70^\circ \leq \varphi_{1.1(1.2)} \leq 70^\circ$ (лінійна ділянка фазочастотної характеристики резонансного контуру).

$$\text{tg } \varphi_{1.1} = Q_{\text{екв}} \frac{\omega_1^2 - \omega_{0\text{екв}}^2}{\omega_1 \omega_{0\text{екв}}}$$

$$\text{tg } \varphi_{1.2} = Q_{\text{екв}} \frac{\omega_2^2 - \omega_{0\text{екв}}^2}{\omega_2 \omega_{0\text{екв}}}$$

де $\varphi_{1.1}$ та $\varphi_{1.2}$ — від-

повідно результати вимірювання фазового зсуву між комплексними напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 на частотах ω_1 та ω_2 . Розв'язавши сумісно два останні рівняння, отримаємо [1]:

$$\omega_{0\text{екв}} = \sqrt{\frac{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \text{tg } \varphi_{1.1} - \omega_1 \text{tg } \varphi_{1.2})}{\omega_1 \text{tg } \varphi_{1.1} - \omega_2 \text{tg } \varphi_{1.2}}}; \quad (7)$$

$$Q_{\text{екв}} = \frac{\sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \text{tg } \varphi_{1.1} - \omega_1 \text{tg } \varphi_{1.2}) (\omega_1 \text{tg } \varphi_{1.1} - \omega_2 \text{tg } \varphi_{1.2})}}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad (8)$$

Таким чином, для знаходження еквівалентних резонансної частоти $\omega_{0\text{екв}}$ та добротності $Q_{\text{екв}}$ паралельного резонансного контуру необхідно виміряти значення частот ω_1 та ω_2 , що знаходяться поблизу еквівалентної резонансної частоти $\omega_{0\text{екв}}$, а також значення фазового зсуву між напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 на цих частотах.

Для того, щоб виміряти такі параметри паралельного резонансного контуру, як характеристичний опір, індуктивність, ємність і т.і., необхідно провести вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг \dot{U}_1 та \dot{U}_2 . Розглянемо результат вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг на частоті ω_1 , який буде дорівнювати

$$A_{1.1} = \frac{\rho_{\text{екв}} Q_{\text{екв}}}{R_0 \sqrt{1 + Q_{\text{екв}}^2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_{0\text{екв}}} - \frac{\omega_{0\text{екв}}}{\omega_1} \right)^2}} = \frac{\rho_{\text{екв}} Q_{\text{екв}}}{R_0 \sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi_{1.1}}} = \frac{\rho_{\text{екв}} Q_{\text{екв}}}{R_0 \sec \varphi_{1.1}} = \frac{\rho_{\text{екв}} Q_{\text{екв}} \cos \varphi_{1.1}}{R_0} \quad (9)$$

Для того, щоб виміряти такі параметри паралельного резонансного контуру, як характеристичний опір, індуктивність, ємність і т.і., необхідно провести вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг \dot{U}_1 та \dot{U}_2 . Розглянемо результат вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг на частоті ω_1 , який буде дорівнювати

Використовуючи співвідношення (9), знайдемо характеристичний опір ρ , індуктивність L , ємність C , активний опір r_K , коефіцієнт згасання α , смугу пропускання $2\Delta\omega$ та еквівалентний резонансний опір R_{EP} паралельного резонансного контуру:

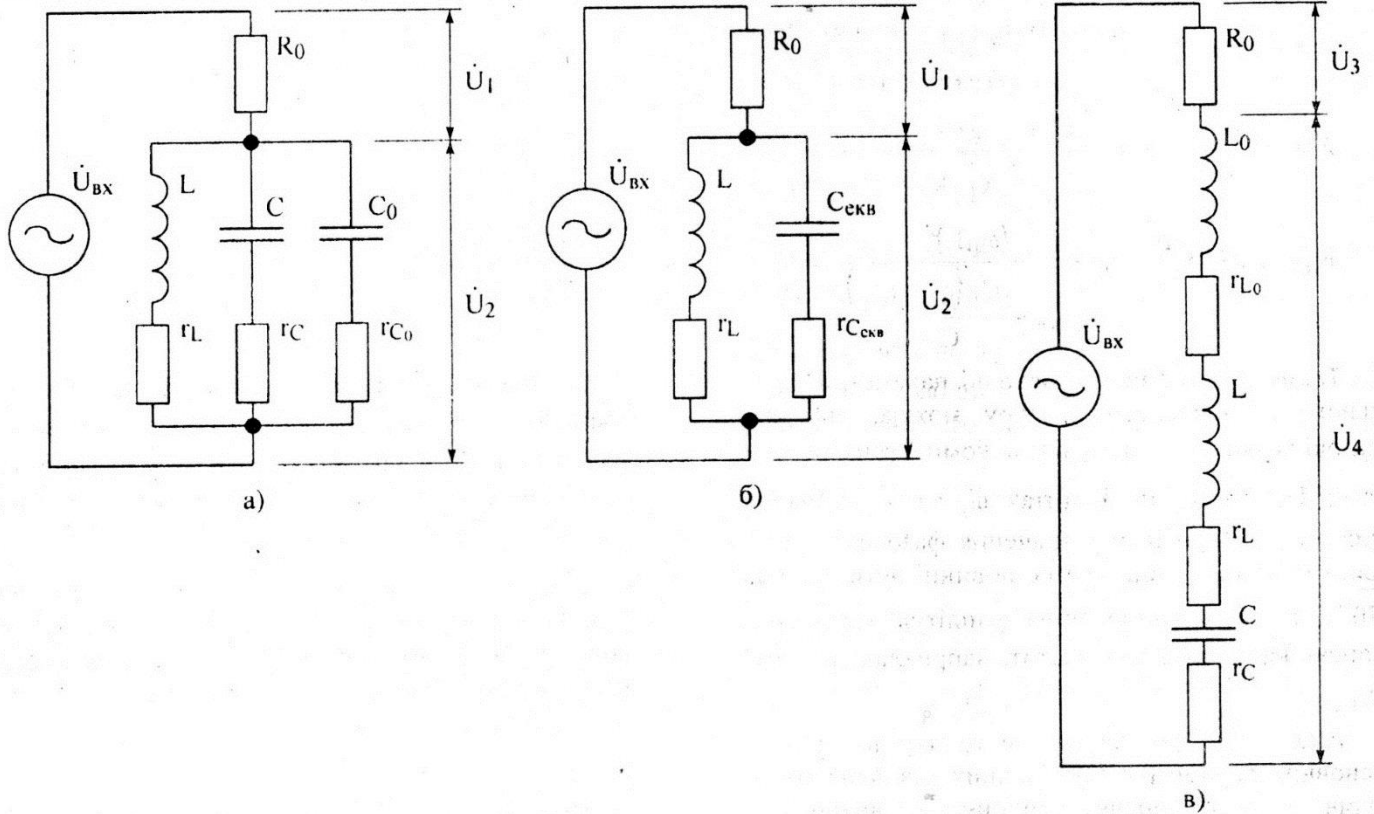


Рис. 1 Еквівалентні схеми вимірювальних перетворювачів для вимірювання основних параметрів паралельних (а, б) та послідовних (в) резонансних контурів

$$A_{1.1} = \frac{\rho_{екв} Q_{екв}}{R_0 \sqrt{1 + Q_{екв}^2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_{0екв}} - \frac{\omega_{0екв}}{\omega_1} \right)^2}} = \frac{\rho_{екв} Q_{екв}}{R_0 \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_{1.1}}} = \frac{\rho_{екв} Q_{екв}}{R_0 \sec \varphi_{1.1}} = \frac{\rho_{екв} Q_{екв} \cos \varphi_{1.1}}{R_0} \quad (9)$$

$$\rho_{екв} = \frac{A_{1.1} R_0}{Q_{екв} \cos \varphi_{1.1}} = \frac{A_{1.1} R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\cos \varphi_{1.1} \sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \tan \varphi_{1.1} - \omega_1 \tan \varphi_{1.2}) (\omega_1 \tan \varphi_{1.1} - \omega_2 \tan \varphi_{1.2})}}; \quad (10)$$

$$L = \frac{\rho_{екв}}{\omega_{0екв}} = \frac{A_{1.1} R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \tan \varphi_{1.1} - \omega_1 \tan \varphi_{1.2}) \cos \varphi_{1.1}}; \quad (11)$$

$$C = \frac{1}{\omega_{0екв} \rho_{екв}} - C_0 = \frac{(\omega_1 \tan \varphi_{1.1} - \omega_2 \tan \varphi_{1.2}) \cos \varphi_{1.1}}{A_{1.1} R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)} - C_0; \quad (12)$$

$$r_{K_{екв}} = \frac{\rho_{екв}}{Q_{екв}} = \frac{A_{1.1} R_0}{Q_{екв}^2 \cos \varphi_{1.1}} = \frac{A_{1.1} R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)^2}{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \tan \varphi_{1.1} - \omega_1 \tan \varphi_{1.2}) (\omega_1 \tan \varphi_{1.1} - \omega_2 \tan \varphi_{1.2}) \cos \varphi_{1.1}}; \quad (13)$$

$$r_K = r_L + r_C = r_{K_{екв}} + r_C - \frac{r_C C + r_{C_0} C_0}{C + C_0} = r_{K_{екв}} + \frac{C_0 (r_C - r_{C_0})}{C + C_0}; \quad (14)$$

$$\omega_0 = \omega_{0екв} \sqrt{1 + \frac{C_0}{C}} = \sqrt{\frac{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \tan \varphi_{1.1} - \omega_1 \tan \varphi_{1.2}) \cos \varphi_{1.1}}{(\omega_1 \tan \varphi_{1.1} - \omega_2 \tan \varphi_{1.2}) \cos \varphi_{1.1} - A_{1.1} R_0 C_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}}; \quad (15)$$

$$\rho = \omega_0 L = \frac{A_{1.1} R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}) \left[(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}) \cos \varphi_{1.1} - A_1 R_0 C_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2) \right]}}; \quad (16)$$

$$Q = \frac{\rho}{r_K} = \frac{\omega_0 L}{r_{K \text{ экв}} + \frac{C_0 (r_C - r_{C_0})}{C + C_0}} = \frac{\omega_0 L (C + C_0)}{r_{K \text{ экв}} (C + C_0) + C_0 (r_C - r_{C_0})}; \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{\omega_0}{2Q} = \frac{r_K}{2L} = \frac{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}) \cos \varphi_{1.1}}{2 A_{1.1} R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)} \left(r_{K \text{ экв}} + \frac{C_0 (r_C - r_{C_0})}{C + C_0} \right); \quad (18)$$

$$2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = 2\alpha = \frac{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}) \cos \varphi_{1.1}}{A_{1.1} R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)} \left(r_{K \text{ экв}} + \frac{C_0 (r_C - r_{C_0})}{C + C_0} \right); \quad (19)$$

$$R_{EP} = \rho Q = \frac{\rho^2}{r_K} = \frac{(\omega_0 L)^2}{r_{K \text{ экв}} + \frac{C_0 (r_C - r_{C_0})}{C + C_0}} = \frac{\omega_0^2 L^2 (C + C_0)}{r_{K \text{ экв}} (C + C_0) + C_0 (r_C - r_{C_0})}. \quad (20)$$

Таким чином, знайти основні параметри паралельного резонансного контуру можна, вимірявши фазові зсуви $\varphi_{1.1}$ та $\varphi_{1.2}$ між комплексними напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 на частотах ω_1 та ω_2 і значення цих частот (при цьому значення фазових зсувів на цих частотах за модулем не повинні бути більшими 70°), а також відношення амплітуд комплексних напруг на одній з цих частот, наприклад, ω_1 , тобто $A_{1.1}$.

Аналогічно розглянемо методику вимірювання основних параметрів послідовних резонансних контурів. В цьому випадку пропонується використовувати вимірювальний перетворювач (рис.1, в), до

складу якого, як і в попередньому випадку, входить зразковий резистор R_0 , власне послідовний резонансний контур, а також зразкова котушка індуктивності з індуктивністю L_0 та активним опором r_{L_0} .

Для спрощення аналізу введемо позначення (рис.1, в), які характерні для зведення двох індуктивностей з втратами, включеними послідовно, до однієї еквівалентної індуктивності з втратами:

$$L_{\text{екв}} = L + L_0;$$

$$r_{L_{\text{екв}}} = r_L + r_{L_0}.$$

Проаналізувавши еквівалентну схему вимірювального перетворювача (рис.1, в), знайдемо комплексні напруги \dot{U}_3 та \dot{U}_4 :

$$\dot{U}_3 = \frac{\dot{U}_{\text{вх}} R_0}{R_0 + Z_{K2 \text{ экв}}} = \frac{U_{\text{вх}} R_0}{\sqrt{(R_0 + r_{K \text{ экв}})^2 + \rho_{\text{екв}}^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{0 \text{ экв}}} - \frac{\omega_{0 \text{ экв}}}{\omega} \right)^2}} \times e^{j \left\{ \varphi_{\text{вх}} - \operatorname{arctg} \frac{\rho_{\text{екв}} \left(\frac{\omega}{\omega_{0 \text{ экв}}} - \frac{\omega_{0 \text{ экв}}}{\omega} \right)}{R_0 + r_K} \right\}}; \quad (23)$$

$$\dot{U}_4 = \frac{\dot{U}_{\text{вх}} Z_{K2 \text{ экв}}}{R_0 + Z_{K2 \text{ экв}}} = \frac{U_{\text{вх}} r_K \sqrt{1 + Q_{\text{екв}}^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{0 \text{ экв}}} - \frac{\omega_{0 \text{ экв}}}{\omega} \right)^2}}{\sqrt{(R_0 + r_{K \text{ экв}})^2 + \rho_{\text{екв}}^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{0 \text{ экв}}} - \frac{\omega_{0 \text{ экв}}}{\omega} \right)^2}} \times e^{j \left\{ \varphi_{\text{вх}} + \operatorname{arctg} Q_{\text{екв}} \left(\frac{\omega}{\omega_{0 \text{ экв}}} - \frac{\omega_{0 \text{ экв}}}{\omega} \right) - \operatorname{arctg} \frac{\rho_{\text{екв}} \left(\frac{\omega}{\omega_{0 \text{ экв}}} - \frac{\omega_{0 \text{ экв}}}{\omega} \right)}{R_0 + r_K} \right\}}, \quad (24)$$

де

$$\dot{Z}_{K2\text{екв}} = r_{K\text{екв}} \left[1 + jQ_{\text{екв}} \left(\frac{\omega}{\omega_{0\text{екв}}} - \frac{\omega_{0\text{екв}}}{\omega} \right) \right] - \text{екві-}$$

валентний комплексний опір послідовного резонансного контуру;

$$R_{\text{екв}} = \omega_{0\text{екв}}(L + L_0) = \frac{1}{\omega_{0\text{екв}}C} = \sqrt{\frac{L + L_0}{C}} - \text{екві-}$$

валентний характеристичний опір резонансного контуру;

$$\omega_{0\text{екв}} = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{екв}}C}} = \frac{1}{\sqrt{(L + L_0)C}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + \frac{L_0}{L}}} =$$

$$= \omega_0 \sqrt{\frac{L}{L + L_0}} < \omega_0$$

еквівалентна резонансна частота послідовного резонансного контуру;

$$Q_{\text{екв}} = \frac{R_{\text{екв}}}{r_{\text{екв}}} - \text{еквівалентна добротність резонанс-$$

ного контуру;

$$r_{\text{екв}} = r_{L_{\text{екв}}} + r_C = r_L + r_{L_0} + r_C - \text{еквівалентний}$$

опір втрат послідовного резонансного контуру.

Фазовий зсув між комплексними напругами \dot{U}_4

та \dot{U}_3 дорівнює

$$\varphi_2 = \arg\{\dot{U}_4\} - \arg\{\dot{U}_3\} = \arctg Q_{\text{екв}} \left(\frac{\omega}{\omega_{0\text{екв}}} - \frac{\omega_{0\text{екв}}}{\omega} \right) =$$

$$= \arctg Q_{\text{екв}} \frac{\omega^2 - \omega_{0\text{екв}}^2}{\omega_{0\text{екв}}\omega}, \quad (25)$$

відношення амплітуд комплексних напруг визначається співвідношенням

$$r_{K\text{екв}} = A_{2.1} R_0 \cos \varphi_{2.1}; \quad (28)$$

$$r_K = r_{K\text{екв}} - r_{L_0} = A_{2.1} R_0 \cos \varphi_{2.1} - r_{L_0}; \quad (29)$$

$$R_{EP} = r_K = A_{2.1} R_0 \cos \varphi_{2.1} - r_{L_0}; \quad (30)$$

$$R_{\text{екв}} = r_{K\text{екв}} Q_{\text{екв}} = \frac{A_{2.1} R_0 \cos \varphi_{2.1} \sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.2}) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.2})}}{\omega_1^2 - \omega_2^2}; \quad (31)$$

$$C = \frac{1}{\omega_{0\text{екв}} R_{\text{екв}}} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{A_{2.1} R_0 \omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.2}) \cos \varphi_{2.1}}; \quad (32)$$

$$L = \frac{1}{\omega_{0\text{екв}}^2 C} - L_0 = \frac{A_{2.1} R_0 (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.2}) \cos \varphi_{2.1}}{\omega_1^2 - \omega_2^2} - L_0; \quad (33)$$

$$\omega_0 = \omega_{0\text{екв}} \sqrt{1 + \frac{L_0}{L}} = \sqrt{\frac{A_{2.1} R_0 \omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.2}) \cos \varphi_{2.1}}{A_{2.1} R_0 (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.2}) \cos \varphi_{2.1} - L_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}}; \quad (34)$$

$$A_2 = \frac{|\dot{U}_4|}{|\dot{U}_3|} = \frac{r_{K\text{екв}}}{R_0} \sqrt{1 + Q_{\text{екв}}^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{0\text{екв}}} - \frac{\omega_{0\text{екв}}}{\omega} \right)^2} \quad (26)$$

Проаналізувавши співвідношення (25), можна зробити висновок, що воно повністю аналогічне співвідношенню (5), тобто еквівалентна резонансна частота $\omega_{0\text{екв}}$ та еквівалентна добротність $Q_{\text{екв}}$ послідовного резонансного контуру визначаються такими самими співвідношеннями, що і для паралельного резонансного контуру (формули (7) та (8)). Однак в формулах (7) та (8) позначення $\varphi_{1.1}$ та $\varphi_{1.2}$ потрібно замінити на $\varphi_{2.1}$ та $\varphi_{2.2}$, де $\varphi_{2.1}$ та $\varphi_{2.2}$ – відповідно результати вимірювання фазового зсуву між комплексними напругами \dot{U}_4 та \dot{U}_3 на частотах ω_1 та ω_2 .

Для того, щоб виміряти такі параметри послідовного резонансного контуру, як характеристичний опір, індуктивність, ємність і т.і., необхідно провести вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг \dot{U}_4 та \dot{U}_3 . Розглянемо результат вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг на частоті ω_1 , який буде дорівнювати

$$A_{2.1} = \frac{r_{K\text{екв}}}{R_0} \sqrt{1 + Q_{\text{екв}}^2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_{0\text{екв}}} - \frac{\omega_{0\text{екв}}}{\omega_1} \right)^2} = \quad (27)$$

$$= \frac{r_{K\text{екв}}}{R_0} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{2.1}} = \frac{r_{K\text{екв}}}{R_0} \sec \varphi_{2.1} = \frac{r_{K\text{екв}}}{R_0 \cos \varphi_{2.1}}$$

Використовуючи останнє співвідношення, знайдемо активний опір r_K , характеристичний опір ρ , еквівалентний резонансний опір R_{EP} , індуктивність L , ємність C , коефіцієнт згасання α та смугу пропускання $2\Delta\omega$ послідовного резонансного контуру:

$$\rho = \frac{A_{2.1}R_0 \sqrt{\omega_1\omega_2(\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.2}) \cos \varphi_{2.1} \left[(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.2}) \cos \varphi_{2.1} - \frac{L_0(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{A_{2.1}R_0} \right]}}{\omega_1^2 - \omega_2^2}; \quad (35)$$

$$Q = \frac{A_{2.1}R_0 \sqrt{\omega_1\omega_2(\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.2}) \cos \varphi_{2.1} \left[(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.2}) \cos \varphi_{2.1} - \frac{L_0(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{A_{2.1}R_0} \right]}}{(A_{2.1}R_0 \cos \varphi_{2.1} - r_{L_0})(\omega_1^2 - \omega_2^2)}; \quad (36)$$

$$\alpha = \frac{\omega_0}{2Q} = \frac{r_K}{2L} = \frac{A_{2.1}R_0 \cos \varphi_{2.1} - r_{L_0}}{2 \left(\frac{A_{2.1}R_0(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.2}) \cos \varphi_{2.1}}{\omega_1^2 - \omega_2^2} - L_0 \right)} =$$

$$= \frac{0.5(A_{2.1}R_0 \cos \varphi_{2.1} - r_{L_0})(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{A_{2.1}R_0(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.2}) \cos \varphi_{2.1} - L_0(\omega_1^2 - \omega_2^2)}; \quad (37)$$

$$2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{r_K}{L} = 2\alpha = \frac{0.5(A_{2.1}R_0 \cos \varphi_{2.1} - r_{L_0})(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{A_{2.1}R_0(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.2}) \cos \varphi_{2.1} - L_0(\omega_1^2 - \omega_2^2)}. \quad (38)$$

Порівнявши співвідношення (18) і (19) та (37) і (38), можна зробити висновок, що коефіцієнт згасання та смуга пропускання для послідовних та паралельних резонансних контурів визначаються однаково. Це пояснюється тим, що послідовні та паралельні резонансні контури описуються однаковими ФЧХ.

Таким чином, в результаті проведеного аналізу еквівалентних схем вимірювальних перетворювачів для вимірювання основних параметрів паралельних (рис.1, а) і послідовних (рис.1, в) резонансних контурів отримано співвідношення (7), (8), (10)÷(20) та (28)÷(38), за якими можна розрахувати основні параметри таких контурів.

Аналізуючи співвідношення, за якими визначаються основні параметри паралельних та послідовних резонансних контурів за допомогою еквівалентних схем вимірювальних перетворювачів (рис.1), можна зробити висновок, що точність таких вимірювань залежить від чотирьох факторів: точності зразкових елементів (прецизійних еталонних активного опору R_0 , конденсатора $\dot{Z}_{C_0} = r_{C_0} + \frac{1}{j\omega C_0}$ та

катушки індуктивності $\dot{Z}_{L_0} = r_{L_0} + j\omega L_0$), точності задавання або вимірювання циклічної частоти генератора вхідного сигналу, точності вимірювання фазового зсуву між вихідними сигналами вимірювального перетворювача, а також точності вимірювання відношення амплітуд вихідних сигналів вимірювального перетворювача.

На сучасній прецизійній елементній базі забезпечення необхідної точності опору R_0 є можливим, тому що існують прецизійні резистори, точність яких складає 0.01% та вище. Точність реактивних

елементів є приблизно на порядок нижчою, однак в будь-якому разі не гірше 0.1%. Тому деяка неточність зразкових елементів фактично не призводить до виникнення суттєвої помилки при вимірюванні основних параметрів паралельних та послідовних резонансних контурів.

Інший параметр, який впливає на точність вимірювання основних параметрів паралельних та послідовних резонансних контурів – циклічна частота ω вхідної напруги вимірювального перетворювача. Враховуючи, що $\omega = 2\pi f$, частоту f можна виміряти, перетворивши її у часовий інтервал, вимірювання якого здійснюється з досить високою точністю (для сучасних частотомірів відносна похибка вимірювання не перевищує 0.005%). Отже, точність в даному випадку теж забезпечується.

Основною проблемою, з точки зору забезпечення точності вимірювання основних параметрів паралельних та послідовних резонансних контурів, є забезпечення точності вимірювання фазового зсуву між вихідними сигналами вимірювального перетворювача та відношення амплітуд цих сигналів.

Проаналізуємо точність вимірювання еквівалентної резонансної частоти за співвідношенням (7). В цьому випадку середньоквадратична відносна похибка вимірювання визначаються як

$$\delta_{\omega_{0екв}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial \omega_{0екв}}{\partial \varphi_1} \sigma_{\varphi} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega_{0екв}}{\partial \varphi_2} \sigma_{\varphi} \right)^2}}{\omega_{0екв}} = \quad (39)$$

$$= \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2) \sqrt{\sin^2 2\varphi_1 + \sin^2 2\varphi_2}}{2(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)(\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2} \sigma_{\varphi}.$$

де σ_φ – середньоквадратичне відхилення відносно похибки вимірювання кута фазового зсуву електронним фазометром.

На основі розробленого вимірювального перетворювача для вимірювання основних параметрів паралельних та послідовних резонансних контурів пропонується структурна схема амплітудно-фазового вимірювача, наведена на рис.2.

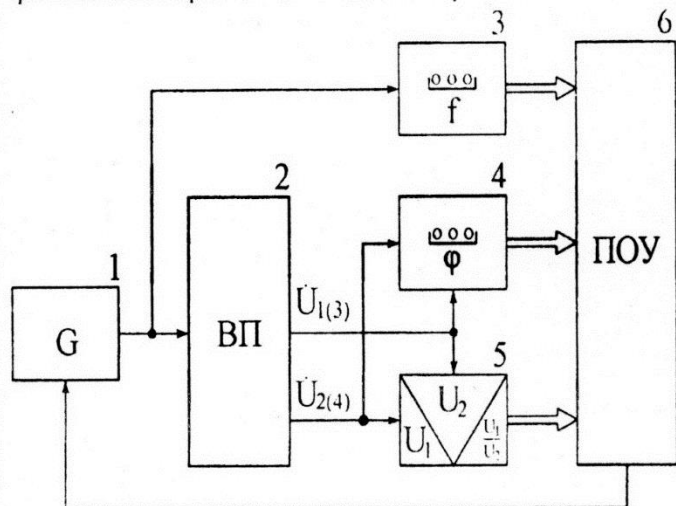


Рис. 2 Структурна схема амплітудно-фазового вимірювача основних параметрів резонансних контурів

Амплітудно-фазовий вимірювач параметрів резонансних контурів складається з генератора змінної частоти 1, вимірювального перетворювача (ВП) 2 (рис.1, а або в), цифрового частотоміра 3, цифрового фазометра 4, цифрового вимірювача відношення амплітуд 5 і пристрою обчислення та управління (ПОУ) 6.

Працює вимірювач таким чином. Генератор змінної частоти 1 виробляє гармонічний сигнал з частотою f_1 (для забезпечення виконання умови $-70^0 \leq \varphi_{1(2)}(\omega_1) \leq 70^0$), який потрапляє на вхід вимірювального перетворювача 2. Виходи вимірювального перетворювача підключені до входів цифрового фазометра 4 та цифрового вимірювача відношення амплітуд 5, а вихід генератора змінної частоти підключений до входу цифрового частотоміра 3. Цифровий частотомір вимірює частоту f_1 гармонічного

сигналу генератора змінної частоти 1, цифровий фазометр – кут фазового зсуву між напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 (або \dot{U}_4 та \dot{U}_3) $\varphi_{1,1}$ (або $\varphi_{2,1}$), а цифровий вимірювач відношення амплітуд – відношення амплітуд цих напруг $A_{1,1}$ (або $A_{2,1}$). Після цього відбувається перестроювання генератора змінної частоти 1 (за сигналом від ПОУ 6) і на частоті f_2 цифровий фазометр 4 вимірює кут фазового зсуву $\varphi_{1,2}$ (або $\varphi_{2,2}$) між напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 (або \dot{U}_4 та \dot{U}_3), а цифровий частотомір 3 – частоту f_2 гармонічного сигналу генератора змінної частоти 1. Результат вимірювання відношення амплітуд разом з результатами вимірювання частоти та кута фазового зсуву потрапляють на ПОУ 6, де і відбувається обчислення результатів вимірювання основних параметрів паралельних та послідовних резонансних контурів. У випадку невиконання умови $-70^0 \leq \varphi_{1(2)}(\omega) \leq 70^0$ ПОУ 6 перестроює генератор змінної частоти 1 для забезпечення її виконання.

Висновки

1. Показано, що основні параметри резонансних контурів (паралельних та послідовних) можна визначити при вимірюванні кута фазового зсуву між двома напругами на виході вимірювального перетворювача (рис.1, а або в), частот цих напруг та відношення амплітуд цих напруг.

2. Проаналізовано залежність похибки вимірювання еквівалентної резонансної частоти резонансних контурів від параметрів вимірювального перетворювача та точності вимірювальних приладів.

3. На основі запропонованих вимірювальних перетворювачів розроблено структурну схему амплітудно-фазового вимірювача основних параметрів паралельних та послідовних резонансних контурів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Рудик А.В. Фазовий метод вимірювання добротності резонансних контурів//Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- та приладобудуванні: Тези доповіді 4 – ої НТК. – Тернопіль. – 2000. – С. 81.

Лежнюк П.Д., Кравцов К.И., Комар В.А.

Подобное моделирование характеристик устройств автоматического регулирования при оптимальном управлении

Проблемы создания новых машин и технологий.

Выпуск 2/2001 (11) С. 134 – 136

Установлено подобие передаточных функций систем автоматического управления. Показана возможность и целесообразность использования подобия при решении задач оптимального управления.

Lezhnjuk P.D., Kravtsov K.I., Komar V.A.

Similarity modeling of automatic regulating devices characteristics under optimal control conditions

Problems of New machines and Technologies Creation.

Transactions issue 2/2001 (11) P. 134 – 136

Similarity of transmission functions of automatic control systems has been established. The possibility and expediency applications for the solution of optimal control functions have been shown.

Рудык А. В., Возняк А. Н., Барановский И. В.

Амплитудно – фазовый метод измерения параметров высокочастотных резонансных контуров

Проблемы создания новых машин и технологий.

Выпуск 2/2001 (11) С. 137 – 143

В статье показано, что основные параметры высокочастотных резонансных контуров (параллельных и последовательных) можно определить при измерении угла фазового сдвига между двумя напряжениями на выходе измерительного преобразователя и отношения амплитуд этих напряжений. Проанализирована зависимость погрешности измерения резонансной частоты резонансного контура от параметров измерительного преобразователя.

Rudyk A. V., Voznyak O. M., Baranovskyy I. V.

The amplitude-phase method of measurement of high frequency resonance contour parameters

Problems of New machines and Technologies Creation.

Transactions issue 2/2001 (11) P. 137 – 143

It has been shown in the article that basic parameters of both high frequency parallel and series resonance contours can be determined by means of measurement of phase displacement angle between two voltages at the output of a measuring converter and of the amplitude ratio of those voltages. A dependence of measurement errors of resonance contour parameter (resonance frequency) on the measuring converter has been analyzed.

Волощенко А.В., Родькин Д.И., Черный А.П., Лашко Ю.В.

Принципы построения систем определения скорости асинхронного электропривода

Проблемы создания новых машин и технологий.

Выпуск 2/2001 (11) С. 144 – 145

В статье рассмотрен метод аналитического расчета мгновенной скорости асинхронного электропривода без датчика скорости. Расчет производится по мгновенным значениям фазных токов и напряжений. В работе выполнен анализ возможных погрешностей расчет для несимметричных условий работы электропривода.

Voloshchenko A.V., Rodkin D.J., Cherny A.P., Lashko Y.V.

Principles of construction of systems of definition of speed of the asynchronous electric motor

Problems of New machines and Technologies Creation.

Transactions issue 2/2001 (11) P. 144 – 145

Here the method of instant analytical calculation speed of induction electric drive without the speed sensors is examined. Phase current and voltage instantaneous values calculation is made. The possible errors analysis for asymmetrical drive operating conditions is made.

Кожушок Г.Н.

Моделирование дизельного двигателя в составе автономной электроэнергетической установки

Проблемы создания новых машин и технологий.

Выпуск 2/2001 (11) С. 146 – 150

В данной статье рассматривается моделирование дизельного двигателя как динамического объекта с помощью классической СДУ и многомерных аппроксимирующих характеристик. Приведены результаты моделирования.

Kozhushok G.N.

Modeling of Diesel Motor as a part of Diesel Generator unit

Problems of New machines and Technologies Creation.

Transactions issue 2/2001 (11) P. 146 – 150

In the given article modeling of Diesel Motor as a part of Diesel Generator unit is considered. The computer model and the structure of a diesel motor are synthesized using basic DE system and multidimensional approximation characteristics. The results of computer modeling are given.

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ-КОМПЕНСАТОРОВ В СЕТЯХ ПИТАНИЯ СКОРОСТНОГО ТРАМВАЯ <i>Ариенчук С.М.</i>	126
ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ ПРИ АКТИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ВНЕШНИЕ КОММУНИКАЦИИ <i>Перекрест А.Л., Соломаха В.Н., Михайличенко Д.А.</i>	130
РАЗДЕЛ 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЕ	
ПОДОБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ <i>Лежнюк П.Д., Кравцов К.И., Комар В.А.</i>	134
АМПЛИТУДНО – ФАЗОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ КОНТУРОВ <i>Рудык А.В., Возняк А.Н., Барановский И.В.</i>	137
ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА <i>Волощенко А.В., Родькин Д.И., Черный А.П., Лашко Ю.В.</i>	144
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ <i>Кожушок Г.Н.</i>	146
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ <i>Толмачев С.Т., Ильченко А.В., Кравченко А.Б., Правда Д.А.</i>	151
ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАЩИТА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ <i>Толмачев С.Т., Ильченко А.В., Кравченко А.Б., Правда Д.А.</i>	154
ИНТЕРПОЛЯЦИОННО-ЭКСТРАПОЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД КОРРЕКЦИИ СИГНАЛОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА <i>Сидоренко В.Н., Черный А.П.</i>	157
УЧЕТ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ЕГО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ <i>Лашко Ю.В., Черный А.П.</i>	159
РАЗДЕЛ 5 РАЗРАБОТКИ И РЕКЛАМА	
СИСТЕМА ПОСЛЕРЕМОНТНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН <i>Гладырь А.И., Родькин Д.И., Барвинок Д.В., Здор И.Е., Хараджан А.А., Бялобржеский А.В., Огарь А.С., Панченко М.В.</i>	163
СИСТЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ БОЛЬШЕГРУЗНЫМИ АВТОСАМОСВАЛАМИ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ <i>Шевченко А.И.</i>	167
ЛАБОРАТОРНЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ НА БАЗЕ ПЭВМ <i>Соболев Ю.В.</i>	169
ОПЫТ РАЗРАБОТКИ УСТРОЙСТВ ОБЛЕГЧЕННОГО ЗАПУСКА СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ <i>Барвинок Д.В., Панченко М.В., Огарь А.С., Родькин Д.И., Чорний А.П., Долженко В.В., Пасмурских А.А., Вошун А.Н.</i>	171

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК КРЕМЕНЧУЦЬКОГО ДЕРЖАВНОГО
ПОЛІТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

2 (11) – 2001

НАУКОВИЙ ЗБІРНИК

Заснований у 1997 році

Друкується за рішенням Вченої ради
Кременчуцького державного політехнічного університету
(протокол № 2 від 25.10.01 р.).
Свідоцтво про реєстрацію серії КВ № 3004 від 19.01.98 р.

Відповідальна за випуск: Капустян Г.Т.

Адреса редакції: 39614, Кременчук, вул. Першотравнева, 20. Кременчуцький державний
політехнічний університет. НДЧ, к. 3210.
Телефон: (05366) 3-62-17. E-mail: nich@polytech.poltava.ua

Надруковано з готових оригіналів в друкарні ПП Щербатих О.В.
Кременчук, вул. Перемоги, 17/6, тел. 3-11-27