

## ВИБІР ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ З СЕЛЕКТИВНОЮ КОРЕКЦІЄЮ

© Карплюк Л.Ф., Панченко Б.Я., 2011

**Проаналізовано роботу системи підпорядкованого керування з селективною корекцією. Розроблено методику вибору типу та параметрів регуляторів. Результати досліджень можна використовувати під час розроблення нових систем електроприводів**

**Ключові слова:** системи регулювання, селективна корекція.

**The control system of electric drives has been analyzed. Method of tuning speed feedback adjusting was developed. The result can be used for the designing new systems of electric drives.**

**Key words:** control system, selects correction.

### Суть проблеми

Основними факторами, що визначають розповсюдження і використання структури системи керування електроприводами, є простота розрахунку, реалізації та налагодження на задані показники в динамічних та статичних режимах роботи. Ці властивості сприяли розповсюдженню багатоконтурних систем, побудованих за підпорядкованим принципом з'єднання контурів регульованих координат (СПР)[1]. Серед них пріоритетно застосовують найпростіші для розрахунку і реалізації двоконтурні одно- і дворазовоінтегруючі системи регулювання швидкості з внутрішнім контуром струму силового кола або моменту двигуна і зовнішнім контуром швидкості. Одноразово інтегрована система використовується для керування електроприводами, основними вимогами для яких є швидкодія, мале перерегулювання швидкості в пуско-гальмівних режимах і високий запас стійкості [2]. Що стосується таких показників, як можливість формувати жорсткість механічних характеристик  $\omega(M)$ , забезпечувати широкий діапазон регулювання швидкості, відновлювати швидкість у режимах дії навантаження, то можливості цих систем обмежені [3]. Це визначається тим, що одноразово інтегруючі системи здійснюють статичне регулювання швидкості, і статична похибка  $\Delta\omega$ , залежить від параметрів силової частини електропривода, що не завжди сприяє значному збільшенню коефіцієнта передачі контуру швидкості і, відповідно, жорсткості механічної характеристики  $\omega(M)$ .

Дворазовоінтегрована система забезпечує формування жорстких механічних характеристик на ділянці стабілізації швидкості двигуна [1]. Ця система здатна здійснювати, як астатичне регулювання швидкості, так і регулювання з заданим статизмом [1]. Система порівняно проста в реалізації, розрахунку і налагодженні, але своєю чергою має істотні недоліки: основні з них – значне перерегулювання швидкості в пуско-гальмівних режимах і режимах дії навантаження, малий запас стійкості, значний час загасання перехідних процесів.

Цей аналіз дасть змогу для доцільності розроблення універсальнішої системи керування, яка поєднує позитивні властивості як одноразово, так і дворазовоінтегруючих СПР, зберігаючи підпорядковану структуру і способи налагодження, а також використання простих регуляторів регульованих координат. Система повинна забезпечити такі показники, як астатизм швидкості, мале перерегулювання швидкості в пуско-гальмівних режимах і режимах дії навантаження, широкий діапазон регулювання швидкості, високий запас стійкості тощо.

### Аналіз останніх досліджень

Для покращення динамічних показників СПР розроблені пристрої і системи. Так для зменшення перерегулювання швидкості в пуско-гальмівних процесах електроприводів з дворазово

інтегруючою СПР, сигнал завдання подають на вхід регулятора швидкості через аперіодичну ланку [1]. Це дозволяє не тільки зменшити перерегулювання швидкості  $\sigma_{ш}\%$ , але й значно зменшує швидкодію системи і, більше того, не покращує динамічні властивості системи електроприводу у разі дії навантаження. Для підвищення статичної точності в електроприводах з одноразово інтегруючою СПР вводять компаундування за струмом, що приводить до збільшення часу перехідного процесу і зменшення запасу стійкості за рахунок провалу в частотних характеристиках на частотах, близьких до частоти зрізу [5]

Відомі комбіновані системи використовують додаткові канали для точнішого відтворення задаючих сигналів і компенсації дії збурювальних факторів на вихідні координати [1,3]. Оскільки параметри регуляторів цих каналів вибирають за умови інваріантності вихідних координат до зовнішніх збурень, то реалізація регуляторів здійснюється за допомогою диференціальних ланок. Наявність цих ланок ускладнює реалізацію комбінованих систем, зменшує їхню завадостійкість, тим більше, що регулятори перебувають поза зоною дії зворотних зв'язків, які не в змозі компенсувати варіації їх параметрів.

Системи з диференціальною корекцією [5] становлять один з варіантів систем з комбінованим керуванням і мають всі переваги та недоліки комбінованих систем.

У роботі [7] пропонується один з можливих варіантів реалізації системи електроприводу з вказаними властивостями, яка побудована на основі класичної СПР, доповненої ланкою вибору режиму (ЛВР). Наявність цієї ланки перетворює СПР в систему зі зміною структури. У запропонованій структурі, ЛВР вмикає в роботу по чергово два регулятори швидкості з передавальними функціями, які забезпечують виконання тих чи інших вимог.

### Задача досліджень

Визначення передавальних функцій регуляторів швидкості системи керування зі зміною структури, побудованої на базі систем підпорядкованого регулювання.

### Виклад основного матеріалу

Проаналізуємо запропоновану систему з вибором або селекцією структури [7], схема якої наведена на рис. 1.

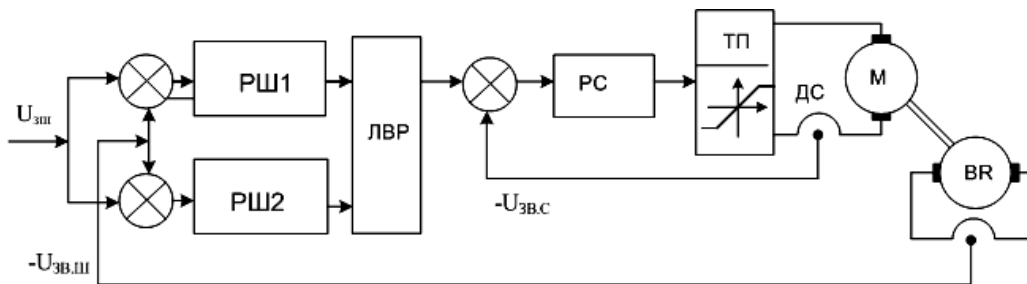


Рис. 1. Схема селекції структури

Вона являє собою електропривід за системою тиристорний перетворювач – двигун постійного струму ТП-Д, керований одним з варіантів запропонованої системи. Система керування складається з двох контурів – контуру струму якорного кола з регулятором РС і контуру швидкості. Контур швидкості містить два підконтури з регуляторами РШ1 і РШ2, з'єднаних паралельно. На входи регуляторів РШ1 і РШ2 подаються однакові сигнали завдання  $U_{зш}$  і зворотного зв'язку за швидкістю  $U_{зв.ш}$ . Вихідні сигнали регуляторів надходять на вхід ЛВР, яка передає функцію керування електроприводом одному з регуляторів. Завдяки ЛВР у кожен проміжок часу працює лише один з регуляторів швидкості, за рахунок того, що один з підконтурів є більш швидкодіючий порівняно з іншим. Що стосується вибору регуляторів і розрахунку їх параметрів, то його пропонується здійснювати за відомими з теорії СПР методами розрахунку[4].

Структурна схема електроприводу зображена на рис. 2, де позначено  $k_{ТП}$  – коефіцієнт передачі ТП;  $c = E_{дн}/\omega_{дн}$  – стала двигуна;  $E_{дн}$ ,  $\omega_{дн}$  – номінальні значення ЕРС і швидкості двигуна;  $T_{як} = L_{як}/R_{як}$  – електромагнітна стала часу якірного кола електроприводу;  $T_{ем} = J_{\Sigma} \cdot R_{як}/c^2$  – електромеханічна стала часу електроприводу;  $k_{зв.ш}$ ,  $k_{зв.с}$  – коефіцієнти передачі зворотних зв'язків за швидкістю і струмом;  $T_{\mu}$  – некомпенсована еквівалентна стала часу.

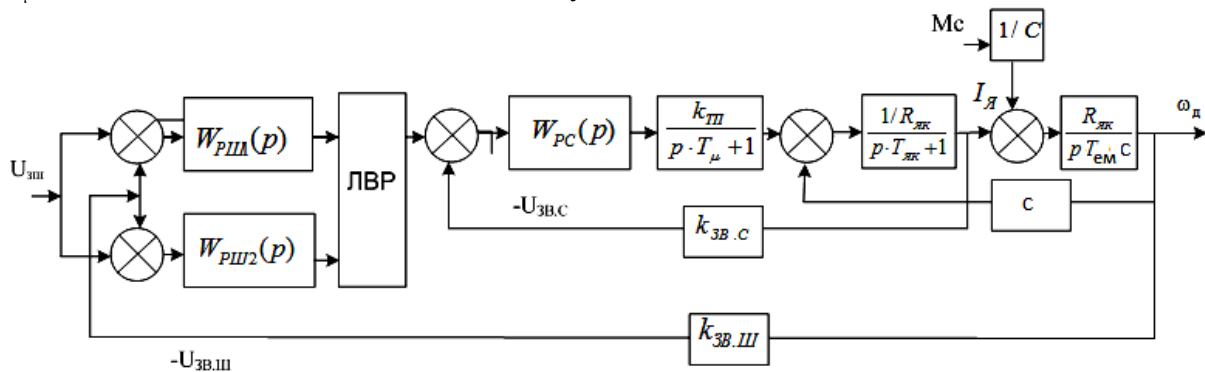


Рис. 2. Структурна схема електроприводу

Параметри регуляторів контурів регулювання здійснимо за відомими методами розрахунку параметрів систем підпорядкованого регулювання [4]. Так параметри регулятора струму РС визначимо за умови «технічної оптимізації», що зумовлює вибір ПІ регулятора. У цьому разі регулятор повинен компенсувати інерційність якірного кола, яка визначається сталою  $T_{як}$ , і забезпечувати швидкодію з некомпенсованою сталою часу  $T_{\mu}$ . Передавальна функція регулятора матиме вигляд

$$W_{РС}(p) = \frac{U_{РС}(p)}{U_{зс}(p)} = \frac{p \cdot T_{як} + 1}{p \cdot T_{ic}}, \quad (1)$$

де  $T_{ic} = a_c \cdot T_m \cdot k_{КП} \cdot k_{зв.с} / R_{як}$  – стала інтегральної складової регулятора;  $a_c$  – коефіцієнт оптимізації.

З урахуванням (1) запишемо передавальну функцію замкненого контуру струму

$$W_{зс}(p) = \frac{I_{я}(p)}{U_{зс}(p)} = \frac{1/k_{зв.с}}{p \cdot a_c \cdot T_m \cdot (p \cdot T_m + 1) + 1}. \quad (2)$$

Розраховувати параметри контуру швидкості можна, використовуючи спрощену передавальну функцію контуру струму [1]

$$W_{зс}(p) = \frac{I_{я}(p)}{U_{зс}(p)} = \frac{1/k_{зв.с}}{p \cdot a_c \cdot T_m + 1}. \quad (3)$$

Визначимо структуру підконтурів швидкості. Для цього розглянемо один з можливих варіантів побудови контурів швидкості. Приймаємо, що перший підконтур з регулятором РШ1 повинен забезпечити швидкодію системи. У такому разі регулятор повинен мати високу частоту пропускання і велику амплітуду вихідного сигналу на високих частотах пропускання. Найпростіше це може реалізувати ПД регулятор з передавальною функцією:

$$W_{РШ1}(p) = \frac{U_{РШ1}(p)}{U_{зш}(p)} = k_{ш} \cdot \frac{p \cdot T_{01} + 1}{p \cdot T_{2\phi} + 1}, \quad (4)$$

де  $k_{ш} = T_{ем} \cdot c \cdot k_{зв.с} / (a_{ш} \cdot T_{му} \cdot k_{зв.ш} \cdot R_{як})$  – коефіцієнт передачі пропорційної складової регулятора;  $T_{01} = 2T_{ш11}$  – стала часу форсуючої ланки, призначеної для компенсації інерційності контуру струму;  $T_{му} = T_m + T_{2\phi}$  – некомпенсована стала підконтуру швидкості з регулятором РШ1;  $a_{ш1}$  – коефіцієнт оптимізації першого підконтуру швидкості.

Відзначимо, що значення  $T_{2\phi}$  для забезпечення завадостійкості системи приймається в межах  $T_{2\phi} \geq (0.2-0.5)T_{\mu}$ .

Враховуючи (4), передавальна функція електроприводу з першим підконтуром швидкості матиме вигляд

$$W_{3III1}(p) = \frac{w(p)}{U_{3III}(p)} = \frac{1/k_{3B..III1}}{p \cdot 2 \cdot T_{mIII1} \cdot (T_{mIII1} + 1) + 1} \quad (5)$$

Передавальна функція (5) відповідає налагодженню на «технічну оптимізацію», зі сталою часу, зменшеною за рахунок дії диференційної складової регулятора.

Оскільки другий підконтур повинен забезпечувати астатизм швидкості, необхідно застосувати регулятор з інтегральною складовою. Це завдання може виконати пропорційно-інтегральний регулятор з передавальною функцією:

$$W_{PIII2}(p) = \frac{U_{PIII2}(p)}{U_{3III}(p)} = k_{III} \cdot \frac{p \cdot 4 \cdot T_{mu2} + 1}{p \cdot 8 \cdot T_{mIII2}^2}, \quad (6)$$

де  $T_{mu} = 2 \cdot T_{mC}$  – некомпенсована стала другого підконтуру швидкості;

Передавальна функція (6) відповідає налагодженню контуру за «симетричним оптимумом».

Відповідно до виразу (6) передавальна функція замкненої системи регулювання швидкості матиме вигляд:

$$W_{3III2}(p) = \frac{w(p)}{U_{3III}(p)} = \frac{(1 + p \cdot T_{mIII2}) / k_{3B..III}}{p^3 \cdot 8 \cdot T_{mIII2}^2 + p^2 \cdot 8 \cdot T_{mIII2} + p \cdot 4 \cdot T_{mIII2} + 1} \quad (7)$$

Аналізувати якість налаштувань систем електроприводу зручно, використовуючи амплітудно-частотні характеристики замкнутої системи  $A(\omega)$ [8].

Відповідно до (5) і (7) в загальному вигляді вирази для амплітудно-частотних характеристик матимуть вигляд

$$A_1(p) = |W_{III1}(j\omega)| = \frac{1/k_{3B..III1}}{\sqrt{(1 - \omega^2 \cdot a_{III} \cdot T_{mIII1}^2)^2 + \omega^2 \cdot a_{III} \cdot T_{mIII1}^2}}, \quad (8)$$

$$A_2(p) = |W_{\theta 2}(j\omega)| = \frac{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot \dot{a}_{\theta}^4 \cdot T_{\mu\theta 2}^2} / k_{\zeta \lambda \theta 1}}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot \dot{a}_{\theta}^2 \cdot T_{\mu\theta 2}^2} \cdot \sqrt{(1 - \omega^2 \cdot \dot{a}_{\theta}^2 \cdot T_{\mu\theta 2}^2)^2 + \dot{a}_{\theta}^2 \cdot (\dot{a}_{\theta} - 1)^2 \cdot \omega^2 \cdot T_{\mu\theta 2}^2}}. \quad (9)$$

У разі налаштування з коефіцієнтом оптимізації  $a_{III} = 2$  вирази (8) і (9) перепишемо як:

$$A_1(p) = |W_{III1}(j\omega)| = \frac{1/k_{3B..III1}}{\sqrt{(1 - \omega^4 \cdot 4 \cdot T_{mIII1}^4)^2}}, \quad (10)$$

$$A_2(p) = |W_{III2}(j\omega)| = \frac{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot 16 \cdot T_{mIII2}^2} / k_{3B..III1}}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot 4 \cdot T_{mIII2}^2} \cdot \sqrt{1 - \omega^2 \cdot 4 \cdot T_{mIII2}^2 + 16 \cdot \omega^4 \cdot T_{mIII2}^4}}. \quad (11)$$

З метою вивчення роботи запропонованої системи регулювання з заданими показниками в динамічних і усталених режимах побудовані амплітудно-частотні характеристики та проведено математичне моделювання системи електроприводу з такими параметрами: двигун:  $\omega_n = 100$  1/с,  $U_n = 220$ В,  $I_n = 100$ А,  $R_{як} = 0.2$  Ом,  $C = 2.0$ В·с; сталі часу і коефіцієнти підсилення силової частини  $T_{ем} = 0.2$ с,  $T_{як} = 0.05$ с,  $T_{\mu} = 0.01$ с,  $k_n = 20$  В/В; коефіцієнти зворотних зв'язків: за струмом:  $k_{зв.с} = 0.1$  А/А, за швидкістю  $k_{зв.ш} = 0.1$  В/В; сталу часу  $T_{2\phi}$  прийняли з умови, що максимальна допустима частота пропускання системи електроприводу не перевищує  $\omega_{зр. \max} \leq 200$  1/с, або  $f_{\max} \leq 33$ Гц. В цьому випадку стала  $T_{2\phi} = 0,005$ с. Перехідні процеси швидкості  $\omega_d(t)$  знімали в режимі розгону і накиду навантаження  $M_c$ . Окремо зображені перехідні характеристики в фазовій площині  $\omega_d(I_{я})$ .

Амплітудно-частотні характеристики наведені на рис. 3, а результати моделювання – на рис. 4. Як видно з рис.3 амплітудно-частотна характеристика системи електроприводу з П регулятором має

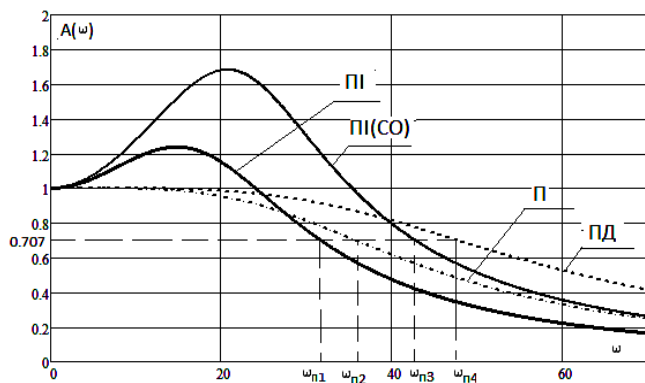


Рис. 3. Амплітудно-частотні характеристики

мінімальну втрату амплітуди  $A(\omega)$  на відрізьку від  $\omega=0$  до частоти пропускання  $\omega_{П1}$ . Введення диференційної складової (характеристика позначена ПД) забезпечило збільшення частоти пропускання до величини  $\omega_{П4}$ , що дало змогу отримати час досягнення усталеного значення, менший, ніж у системи, налаштованої на симетричний оптимум ( $t_{П3}$ ). Максимальна амплітуда практично не перевищує значення при нульовій частоті, що й зумовлює малі перерегулювання за високої швидкодії, як видно з рис. 4, реалізуються стандартні для такого налаштування регулятора показники:

час регулювання  $t_{рег} \approx 4.1 T_{\muш}$ , перерегулювання  $\sigma_{ш}\% \leq 4.3\%$ . Як видно з рис 4, б, при накиді навантаження система має статичну похибку підтримання швидкості при дії навантаження.

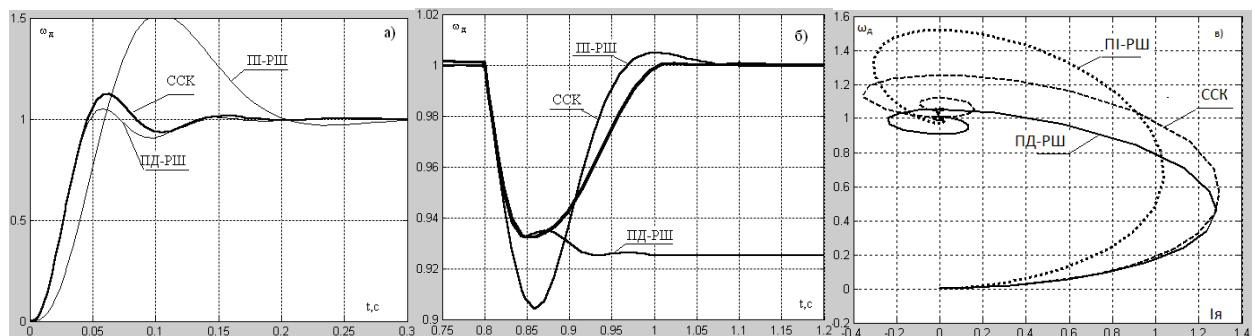


Рис. 4. Результати моделювання

Характеристика системи електроприводу, налаштованої на симетричний оптимум  $A_2(\omega)$  (позначена ПІ(СО)), не має відрізьку з постійною амплітудою  $A_2(\omega) = \text{const}$ . Максимальна амплітуда  $A_{2\text{max}} = 1.7A(0)$ , тому друга підсистема коливна, з малим запасом стійкості при виході на усталене значення швидкості. Амплітуда характеристики падає на частотах, значно менших, ніж частота пропускання  $\omega_{П4}$  першої системи, що зумовлює її повільнішу реакцію на швидкоплинні керуючі впливи та збурення. Відповідно, як це видно з рис. 4, а, забезпечуються такі показники: час регулювання або час перетину усталеного значення заданого значення швидкості  $t_p = 3,1 \cdot 2T_{\muш} = 3,1 \cdot 4T_{\mu} = 12,4 T_{\mu}$ , перерегулювання  $\sigma_{ш} \geq 43\%$ , і астатизм за накиду навантаження.

Система з двома підконтурями, у разі перемикавання регуляторів швидкості на частоті, коли амплітуди характеристик є однаковими, здатна забезпечувати високу швидкодію, перерегулювання регульованої координати швидкості  $\sigma_{ш}\% \leq 20\%$ , астатизм швидкості до збурюючого фактора – дії навантаження. Як показали дослідження, зменшити перерегулювання можна, зменшуючи амплітуду амплітудно-частотної характеристики в зоні роботи ПІ від регулятора (характеристика ПІ рис. 3) за рахунок зменшення сталої часу його інтегральної складової. У такому разі швидкодія забезпечується за рахунок роботи на високих частотах ПД регулятора. Амплітуда і загасання коливачь, які визначає ПІ регулятор, за його роботи на низьких частотах при цьому зменшаться.

### Висновки

1. Система з селективним вибором підконтур регулювання швидкості забезпечує високу швидкодію електроприводу, мале перерегулювання швидкості в пуско-гальмівних режимах і режимах дії навантаження, астатизм швидкості, широкий діапазон регулювання швидкості.

2. Один з підконтурів регулювання швидкості потребують налаштування на «технічний оптимум» з диференційною складовою в контурі регулювання, другий – налаштування на «симетричний оптимум».

3. Коливність системи електроприводу з селективною корекцією у разі виходу на усталену швидкість, можна зменшити, зменшуючи інтегральну складову ПІ регулятора другого підконтуру швидкості.

3. Розрахунок параметрів та налагодження контурів регулювання не вимагає спеціальних методів, окрім традиційних для систем підпорядкованого регулювання.

1. *Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін., За ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.* 2. *Шапарев Н.К. Автоматизация типовых технологических процессов металлообработки. Расчет и проектирование. – Киев; Одесса: Вища шк., 1984. – 312 с.* 3. *Теория автоматического управления. Ч. 1: Теория линейных систем автоматического управления / под ред. А.А. Воронова. – М.: Высш. шк., 1986. – 367 с.* 4. *Рудаков В.В., Мартикайнен Р.П. Синтез электроприводов с последовательной коррекцией. – Л.: Энергия, 1972.* 5. *Ньютон Дж.К., Гулд Л.А., Кайзер Дж.Ф. Теория линейных следящих систем. – М.: Физматгиз, 1961. – 407 с.* 6. *Емельянов С.В. Теория систем с переменной структурой. – М.: Наука, 1970. – 590 с.* 7. *Лозинський О.Ю., Панченко Б.Я., Карплюк Л.Ф., Система підпорядкованого керування з селективною корекцією // Вісн. нац. техн. ун-ту "ХПІ". – 2010. – Вип. 30. – С. 518–519.* 8. *Чернат Г., Майер Р. Проектирование и расчет следящих систем и систем регулирования. – М.: Энергия, 1959. – Ч. 1. – 487 с.*

УДК 621.316.1.052

**В.С. Коновал, А.Б. Козовий, А. Жук, О.І. Скрипник, Т.О. Товстяк**  
Національний університет "Львівська політехніка",  
ТЗОВ "ЕЛЕКС"

## **ЦИФРОВИЙ ПРИСТРІЙ АВТОМАТИКИ ЛІКВІДАЦІЇ АСИНХРОНОГО РЕЖИМУ АЛАР-Ц**

© Коновал В.С., Козовий А.Б., Жук А., Скрипник О.І., Товстяк Т.О., 2011

**Розглянуто особливості функціонування та задання вхідної інформації для пристрою АЛАР-Ц та здійснено перевірку правильності спрацювання виявних органів АЛАР-Ц за допомогою програмного комплексу ДАКАР.**

**Ключові слова:** асинхронний режим, стійкість, пристрій протиаварійної автоматики, моделювання режимів, електроенергетична система .

**The features of operation and default input data for ALAR-C and by verification of setting operation of ALAR-C using software DAKAR.**

**Key words:** asynchronous mode, stability, emergency automatics device, mode simulation, electric power system.

### **Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень**

Як відзначено в [1], найважчим аварійним режимом для електроенергетичної системи є асинхронний режим (АР). Це пов'язано з порушенням стійкості паралельної роботи електростанцій і окремих генераторів, що в остаточному результаті призводить до великих економічних збитків.

В [1] наведено приклад задання інформації та проведено дослідження аварійних ситуацій в ЕЕС з типовими пристроями автоматики ліквідації асинхронного режиму (АЛАР) на базі панелей ЕПО-1075, 1076 та 1073, які отримали широке розповсюдження в енергосистемах. Останнім часом в енергосистемах України та Росії почали використовувати цифровий пристрій автоматики ліквідації асинхронного режиму АЛАР-Ц (розробка ВАТ НППТ, ТОВ НВП «Модус» (м. Санкт-Петербург)) [2].

### **Задача досліджень**

Задачею дослідження є розроблення спеціалізованого програмного модуля для моделювання пристрою АЛАР-Ц.