

звідки з врахуванням (11)

$$a_{\rho 3} = a_{\tau 3} = a_{\theta 1} = a_{\theta 2} = 0; a_{\theta 3} = 1. \quad (24)$$

Оскільки в системі координат  $Oq_1q_2$  тензор  $\mu$  має вигляд квадратної матриці другого порядку, то, враховуючи (24), з елементів  $\mu_{q_1q_1}, \mu_{q_1q_2}, \mu_{q_2q_1}, \mu_{q_2q_2}$  матриці (18) одержимо

$$\mu = \begin{Bmatrix} \mu_{q_1q_1} & \mu_{q_1q_2} \\ \mu_{q_2q_1} & \mu_{q_2q_2} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\Delta_1} \begin{Bmatrix} \mu_{\rho} a_{\rho 1} a_{\tau 2} - \mu_{\tau} a_{\rho 2} a_{\tau 1} & (\mu_{\rho} - \mu_{\tau}) a_{\rho 2} a_{\tau 2} \\ -(\mu_{\rho} - \mu_{\tau}) a_{\rho 1} a_{\tau 1} & -\mu_{\rho} a_{\rho 2} a_{\tau 1} + \mu_{\tau} a_{\rho 1} a_{\tau 3} \end{Bmatrix}, \quad (25)$$

де

$$\Delta_1 = a_{\rho 1} a_{\tau 2} a_{\theta 3} - a_{\rho 2} a_{\tau 1} a_{\theta 3}. \quad (26)$$

1. Фільц Р.В. До теорії електромагнітного поля в нелінійних середовищах // Питання теорії та регулювання електричних машин. – Львів, 1967. – Вип. 15. – С. 22–29. 2. Бермант А.Ф. Отображення. Криволинейные координаты. Преобразования. Формулы Грина. – М., 1958. – 306 с.

УДК 631.365

Ю.М. Жовнір, В.Г. Турковський

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕППМС

## КОМУТАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ З УСТАНОВКОЮ СТАБІЛІЗАЦІЇ РЕЖИМУ

© Жовнір Ю.М., Турковський В.Г., 2002

**Представлені результати дослідження процесів увімкнення на неробочий хід та вимкнення установки стабілізації режиму дугової сталеплавильної печі на базі індуктивно-ємнісного перетворювача джерела напруги в джерело струму.**

**Introduce is results of research the proceses of switch on singl idling and switch off stabilisation installation of mode the arc furnace steel-melting on basic inductive-capacitance converter voltage source in the current source**

За традиційної схеми електропостачання дугових сталеплавильних печей (ДСП) змінного струму внаслідок різкозмінного характеру їх навантаження виникають коливання струмів фаз, які зумовлюють зменшення корисної потужності, що вводиться в піч, збільшуються втрати електроенергії в елементах системи електропостачання (СЕР), а також тривалість плавки й відповідно теплові втрати. Крім того, коливання струмів печі зумовлюють появу коливань напруги мережі, які можуть перевищувати допустимі рівні й в свою чергу негативно впливати на ефективність паралельно працюючих електроприймачів, зокрема інших ДСП.

Одним з перспективних заходів комплексного вирішення проблем енергоощадності та електромагнітної сумісності електропостачання ДСП є застосування установки стабілізації режиму (УСР) на базі індуктивно-ємнісного перетворювача джерела напруги в джерело струму, яка вмикається між джерелом живлення й власне пічною електроустановкою [1, 2, 3]. Як

показано в [4], застосування в СЕП ДСП середньої місткості установки стабілізації режиму дозволяє зменшити тривалість плавки майже на 8 %, витрати електроенергії на 20 %, графітових електродів на 40 % при порівняно невеликому терміні окупності, навіть без врахування основної переваги УСР – зменшення коливань напруги та необхідної потужності СЕП.

Як відомо, технологічний процес виплавлення сталі в дугових електропечах супроводжується великою кількістю комутацій (декілька десятків за добу) електропічного контуру. Це зумовлює перехідні процеси в системі електропостачання, негативними наслідками яких є значні кидки струмів та перенапруги в елементах системи, що скорочує термін служби електротехнічного обладнання, а також може призвести до виходу його з ладу. Крім того, за наявності в системі електропостачання печі УСР за певних умов (зокрема в усталеному режимі після увімкнення на неробочий хід) можливе виникнення ферорезонансних явищ на гармоніках основної частоти джерела живлення, субгармоніках та ультрагармоніках, що зумовлено нелінійністю характеристик трансформатора і дроселя. Як показав огляд літературних джерел, такі режими установки, виконаної на базі відомих схем індуктивно-ємнісних перетворювачів, є недостатньо дослідженими, що ускладнює визначення встановленої потужності обладнання та рівень аварійного впливу параметрів режиму на елементи системи електропостачання печі.

Система електропостачання ДСП з УСР складається з джерела живлення, кабельної лінії, вимикачів, власне УСР, пічного трансформаторного агрегату, короткої мережі та печі (рис. 1).

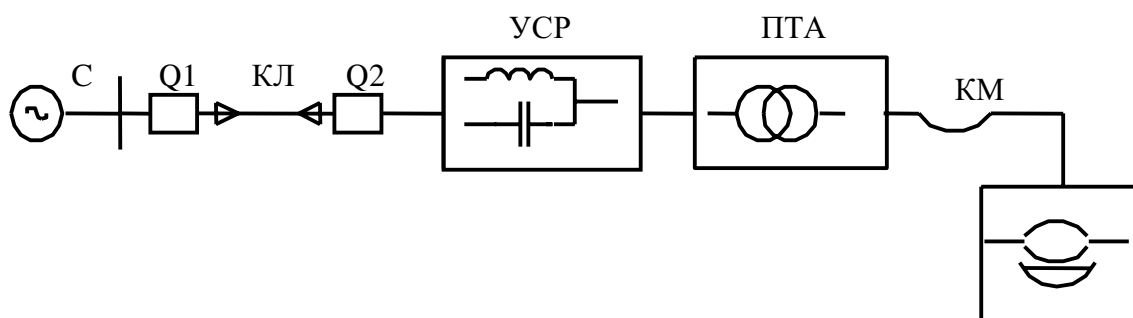


Рис. 1. Схема електропостачання ДСП з УСР

На схемі прийнято такі позначення: С – шини вторинної напруги трансформатора головної понижаючої підстанції; Q1 – вимикач приєднання на головній понижаючій підстанції; Q2 – пічний вимикач; УСР – установка стабілізації режиму; КЛ – кабельна лінія; ПТА – пічний трансформаторний агрегат; КМ – коротка мережа (вторинний струмопідвід); ДСП – дугова сталеплавильна піч.

Для дослідження комутаційних процесів в СЕП ДСП з УСР використано цифрову математичну модель, сформовану за допомогою прикладного програмного пакета для аналізу перехідних та усталених режимів електротехнічних та електромеханічних систем [5].

В основу математичної моделі покладено рівняння стану електричних і магнітних кіл в контурних координатах

$$\Gamma \begin{vmatrix} \mathbf{L}(\mathbf{i}) & \mathbf{k}_t \\ \mathbf{k}_t & -\mathbf{R}'_{\mu}(\varphi) \end{vmatrix} \Gamma_t \left| \frac{d\mathbf{i}_k}{dt}, \frac{d\varphi_k}{dt} \right| - \Gamma(\mathbf{e} - \mathbf{R}\mathbf{i} - \mathbf{u}(\mathbf{i}) - \mathbf{u}_c, \mathbf{0}) = 0; \quad (1)$$

$$(\mathbf{i}, \varphi) = \Gamma_t(\mathbf{i}_k, \varphi_k); \quad (2)$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{u}_c) \frac{d\mathbf{u}_c}{dt} = \mathbf{i}, \quad (3)$$

де  $\Gamma$  – матриця незалежних контурів електричних і магнітних кіл;  $\mathbf{i}, \mathbf{e}, \mathbf{u}(\mathbf{i}), \mathbf{u}_c$  – відповідно вектори контурних струмів, електрорушійних сил, спадів напруг на нелінійних резистивних елементах і ємностях віток;  $\varphi$  – вектор зведених до первинної обвитки поточкозчеплень віток магнітного кола;  $\mathbf{R} = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_n)$  – діагональна матриця резистансів віток;  $\mathbf{C} = \text{diag}(C_1, C_2, \dots, C_n)$  – діагональна матриця ємностей віток;  $\mathbf{L}$  – матриця диференціальних індуктивностей та взаємних індуктивностей віток;  $\mathbf{K}$  – матриця коефіцієнтів трансформації;  $\mathbf{R}'_{\mu}(\psi) = \text{diag}(\bar{R}'_{\mu 1}(\psi_1), \bar{R}'_{\mu 2}(\psi_2), \dots, \bar{R}'_{\mu m}(\psi_m))$  – діагональна матриця зведених до одного витка диференціальних магнітних опорів, кожен елемент якої визначається як  $R'_{\mu m} = R_{\mu m} / w^2$ , де  $R_{\mu m}$  – диференціальний магнітний опір вітки;  $w$  – кількість витків обвитки, до якої зведено поточкозчеплення цієї вітки;  $(\mathbf{i}_k, \varphi_k)$  – узагальнений вектор невідомих контурних координат. При цьому використаний числовий метод інтегрування – формул диференціювання назад.

Під час моделювання процесів увімкнень мережа зовнішнього електропостачання представлялась джерелом ЕРС та активно-індуктивним її внутрішнім опором. Комутаційний апарат (вимикач Q2) представлений як нелінійний елемент, опір якого у ввімкненому стані дорівнює нулю, а у вимкненому – набагато перевищує опір елемента з найбільшим реактансом.

Силовий реактор та конденсаторна батарея УСР представлені відповідно лінійними індуктивністю та ємністю та увімкненими послідовно з ними резисторами. Добротність вітки з силовим реактором прийнята 100, з конденсаторною батареєю 220. Шунтвний реактор УСС та пічний трансформатор представлені в моделі нелінійними вітками за кусково-лінійної апроксимації їх кривих намагнічення. Коротка мережа електронічної установки представлена в моделі віткою з активно-індуктивним опором. Крім того, зроблені такі припущення:

- електрорушійні сили джерела живлення створюють симетричну трифазну систему напруг;

- електричні опори елементів трьох фаз є рівними;

- пічний трансформатор та шунтвний реактор УСР мають симетричну магнітну систему.

З метою визначення умов виникнення екстремальних значень параметрів режиму під час увімкнень на неробочий хід ДСП з УСР, на математичній моделі здійснено низку експериментів. При цьому розглянуто такі варіанти комутацій:

- увімкнення окремого контуру УСР з силовим реактором та електропічним трансформатором;

- увімкнення окремого контуру з конденсаторною батареєю УСР та пічним трансформатором;

- увімкнення УСР з силовим реактором, конденсаторною батареєю, шунтвним реактором та без нього при початкових кутах увімкнення відносно ЕРС джерела живлення від 0 до 90 ел. град.

Отримано, що екстремальні значення параметрів перехідного режиму у розглянутих варіантах комутацій практично не залежать від моменту замикання контактів пічного вимикача. Увімкнення на неробочий хід УСР окремого контуру з силовим реактором

супроводжується помірними кидками струмів пічного трансформатора (на рівні 0,5 від номінального амплітудного значення струму трансформатора), в той час як увімкнення такого трансформатора безпосередньо до джерела живлення (традиційна схема електропостачання дугової печі) 3,5–5 кратним збільшенням його струму відносно номінального амплітудного значення. Під час увімкнення окремого контуру УСР з конденсаторною батареєю та одночасного увімкнення контурів УСР з реактором та конденсаторною батареєю виникають значні кидки струмів трансформатора та батареї та перенапруги. Під час увімкнення УСР з шунтівним реактором зменшується рівень екстремальних значень параметрів режиму конденсаторної батареї та трансформатора, але водночас суттєво зростає максимальне значення струму шунтівного реактора.

Проведено також низку експериментів, які дозволили визначити вплив характеристик елементів в УСР на екстремальні значення параметрів режиму під час перехідного процесу після увімкнення на неробочий хід. Зокрема, оцінено вплив величини розрахункової індукції магнітопроводу пічного трансформатора на екстремальні значення параметрів режиму. Зі збільшенням розрахункової індукції зменшуються екстремальні значення параметрів режиму: струму та напруги пічного трансформатора, струму конденсаторної батареї. Зменшення розрахункової індукції магнітопроводу трансформатора навпаки призводить до значного зростання екстремальних значень параметрів режиму. Пояснюється це зміною диференційної індуктивності трансформатора в режимі неробочого ходу.

Змодельовано процеси увімкнення ДСП-25 з пічним трансформаторним агрегатом ЕТЦНК-13500/10 та УСР на неробочий хід за умови резонансного настроювання на частоті джерела живлення силового реактора та конденсаторної батареї. Характерною особливістю перебігу таких процесів є багатократне збільшення під час перехідного (рис. 2) та усталеного (рис. 3) режимів струмів шунтівного реактора ( $I_{шр}$ ) та конденсаторної батареї ( $I_{кб}$ ). Напруга конденсаторної батареї зростає в 2,5 раза відносно номінального амплітудного значення. Це пояснюється виникненням ферорезонансних явищ на основній гармоніці та на субгармоніках. Визначена за таких умов відносна сумарна встановлена потужність обладнання УСР становила б 8 одиниць.

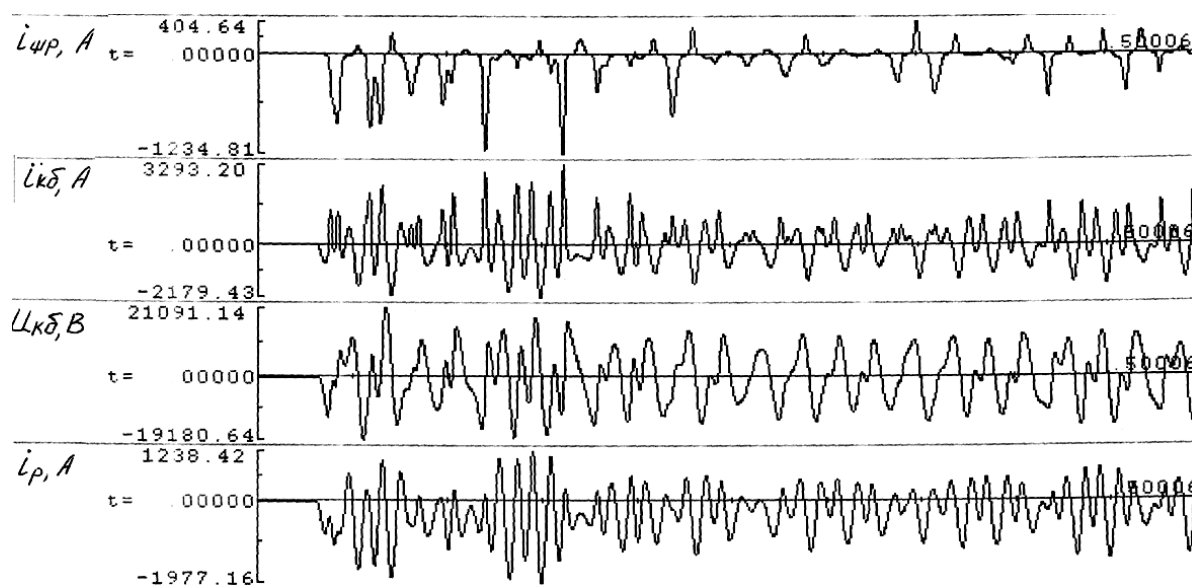


Рис. 2. Збільшення струмів шунтівного реактора та конденсаторної батареї під час перехідного режиму

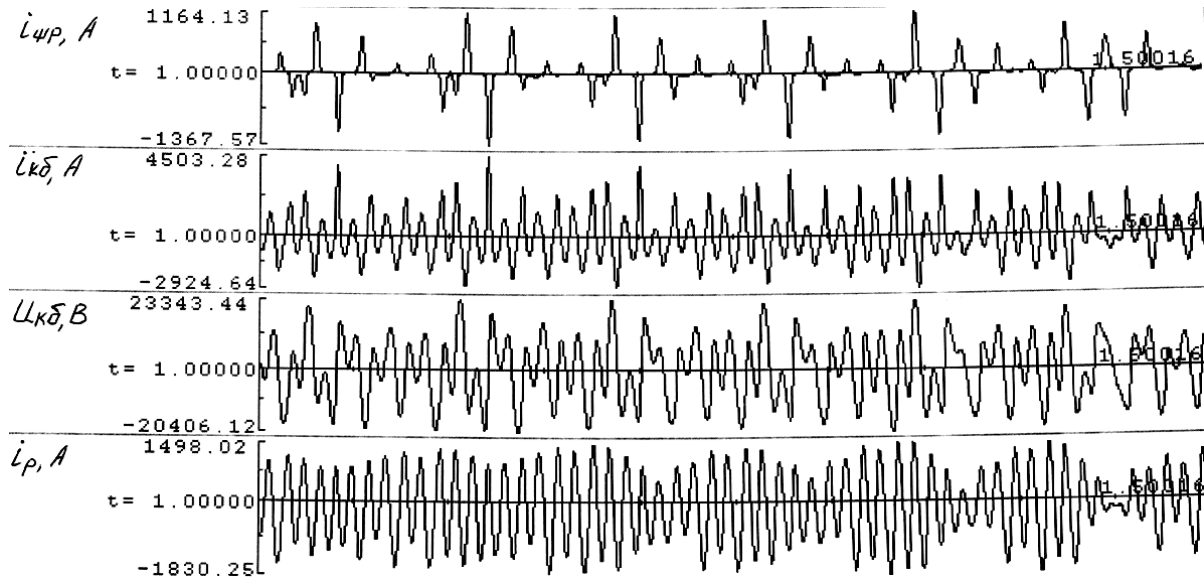


Рис. 3. Багатократне збільшення струмів шунтівного реактора та конденсаторної батареї під час усталеного режиму

Суттєво зменшити встановлену потужність елементів УСР можна шляхом розстроювання резонансного контуру, що утворюється силовим реактором та конденсаторною батареєю установки та застосуванням в такій схемі формувальних елементів для уникнення ферорезонансних явищ. На рис. 4, 5 зображені часові діаграми струмів та напруг елементів УСР під час перехідного та усталеного режимів після увімкнення на неробочий хід у нерезонансній схемі з формувальними елементами. У цьому випадку параметри режиму елементів схеми знаходяться на рівні номінальних значень, а відносна сумарна встановлена потужність обладнання становить 2 одиниці, що забезпечує сприятливі техніко-економічні показники УСР.

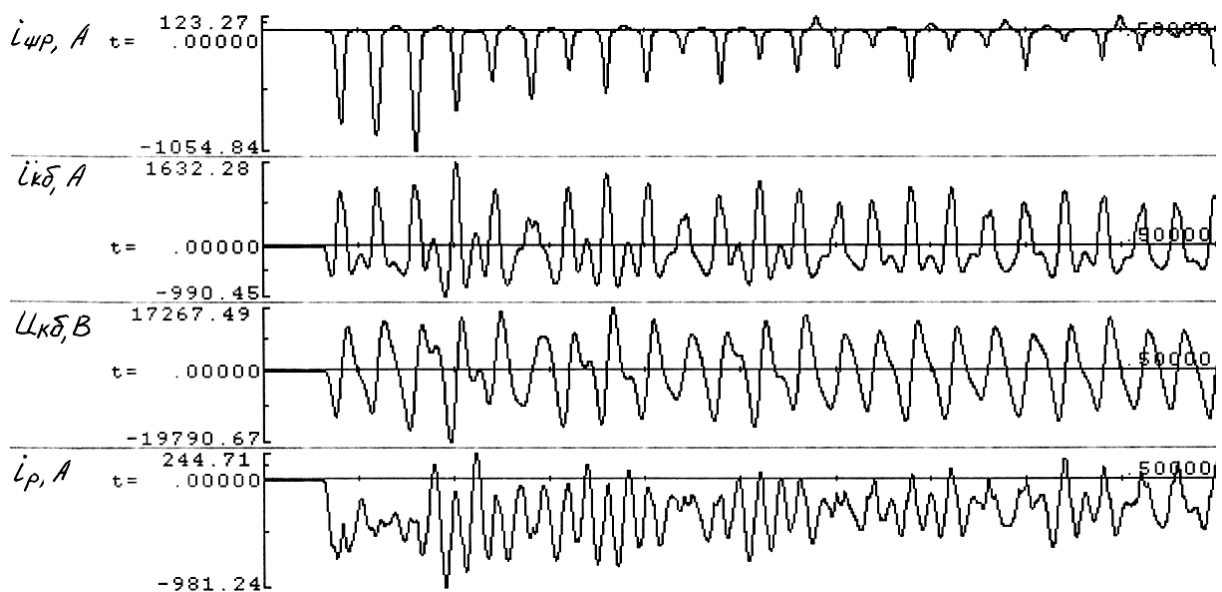


Рис. 4. Часові діаграми струмів та напруг

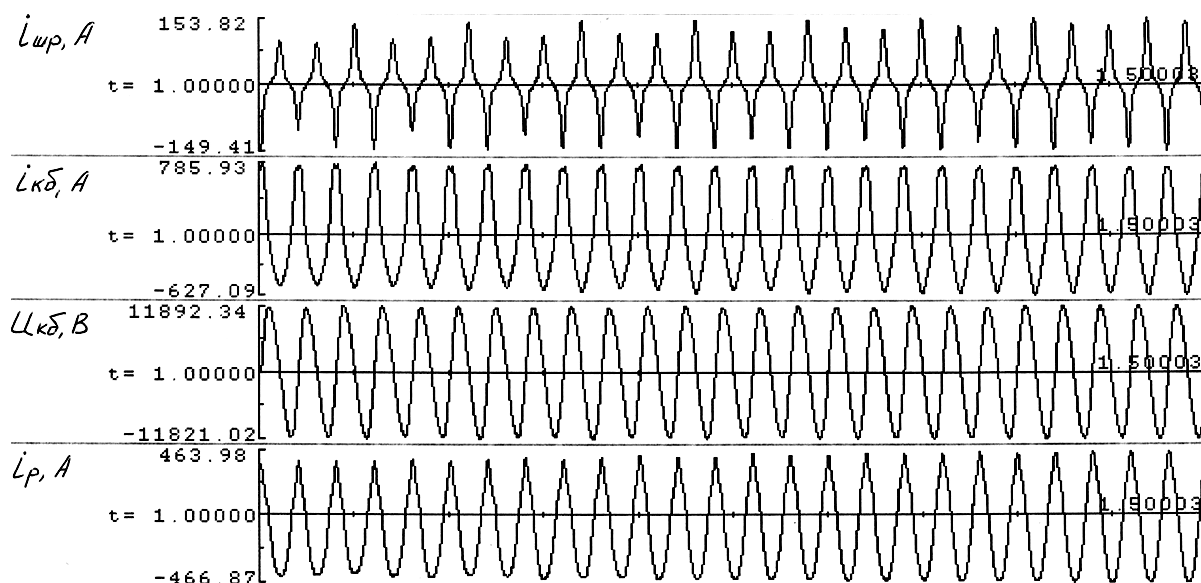


Рис. 5. Часові діаграми струмів та напруг

Для дослідження процесів вимкнення УСР від джерела живлення використовувалась вищеописана модель СЕП, в яку додатково введено модель кабельної лінії (у вигляді трьох послідовно сполучених П-подібних ланок), а також враховані ємності обладнання відносно землі. Проведені експерименти вимкнень УСР від джерела живлення показали, що умови роботи ізоляції обладнання СЕП та УСР є "легшими", ніж за традиційної схеми електропостачання печі. Це пояснюється тим, що малі ємності обладнання відносно "землі" в схемі з УСР виявляються зашунтованими великою ємністю конденсаторної батареї установки й практично не впливають на характер перехідного процесу.

1. Малиновский А.А., Турковский В.Г. Основные характеристики дуговых сталеплавильных печей при различных системах питания // *Техническая электродинамика*. – 1993. – № 4. – С. 42–45. 2. Малиновський А.А., Турковський В.Г., Олійник М.Й. Зменшення коливань напруги в системах електропостачання з дуговими сталеплавильними печами // *Сб. тр. III Міжнарод. науч. конф. "Ефективність і якість електропостачання промислових підприємств"*. – Мариуполь, 1994. – С. 118–119. 3. Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Принципы построения и оптимизации схем индуктивно-емкостных преобразователей. – К., 1981. – 176 с. 4. Турковский В.Г., Жовнир Ю.М. Обоснование эффективности применения установки стабилизации режима в системе электропостачання дуговых сталеплавильных печей переменного тока // *Промышленная энергетика*. – 2001. – № 5. – С. 40–44. 5. Гоголюк П., Гречин Т., Равлик О. Математичне моделювання перехідних процесів електропостачальних систем з вентилями пристроями та динамічним навантаженням. // *Тез. доп. 3-ї Міжнар. наук.-техн. конф. "Математичне моделювання в електротехніці, електроніці й електроенергетиці"*. – Львів, 1999. – С. 55–56