

УДК 621.311

## АНАЛІЗ КОЛИВНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОТУЖНОЇ ДСП

© Гудим В., Скрипник О., Баран П., 2003

*Проаналізовано коливні процеси у системі електропостачання ДСП-100, які існують на стадії розплавлення металу. На основі частотного аналізу виявлено частоти струмів і напруг дуг ДСП та системи електропостачання, які викликані виключно поведінкою дуг, а не іншими причинами, наприклад, підмагнічуванням магнітних систем трансформаторів*

*In this work we have made an analysis of oscillating processes in power supply system DSP-100 which takes place during metal melting. Basing on frequency analysis we have located frequencies of the currents and voltages of the discharges and power supply system which are caused only by behaviour of the discharges and not by other reasons like saturation of the magnetic systems of the transformers*

### Постановка проблеми

Експлуатаційні закорочення електродів на шихту та раптові обриви дуг на стадії розтоплення металу в дугових сталеварних печах (ДСП) викликають коливання потужностей, струмів, магнітних потоків та напруг як у силовому електрообладнанні, так і в системі електропостачання загалом.

Відповідно до стандарту на якість електричної енергії в електричних мережах загального користування коливні процеси обмежуються двома основними показниками, зокрема розмахом зміни величини напруги більше ніж у два рази за секунду зі швидкістю 0,1%/с для освітлення та 0,2%/с для решти електроприймачів і дозою коливань [1].

Згідно із літературними джерелами коливання напруг та струмів в системі електропостачання ДСП відбуваються із частотами від одиниць до 30 Гц, які, поширюючись в електричні мережі підприємств, негативно впливають на асинхронні двигуни, потужні електромагніти та ін. [2, 3]. Особливо чутливим до таких коливань є електричне освітлення, коли миготіння освітлення збігається з частотою коливання підведеної напруги, викликаючи за таких умов флікер-ефект. Відомо, що око людини найчутливіше до флікера частотою 8–12 Гц [1]. Тому дослідження коливних процесів у системі електропостачання ДСП є актуальною задачею.

### Аналіз останніх досліджень

Сьогодні відсутня ефективна оцінка швидкості зміни напруги у системі живлення та науково обґрунтована статистика про вплив коливань напруг, струмів і магнітних

полів на нервову й серцево-судинну системи людини, хоча такі дослідження спеціалістами проводяться [4].

Державним стандартом України та стандартами інших країн світу нормуються коливання напруги у точці приєднання споживачів, проте доцільно розробляти методику для нормування коливань лінійних струмів систем електропостачання, що дозволить покращити оцінку коливних процесів [1].

### Постановка задачі

Метою роботи є аналіз коливних процесів у системі електропостачання ДСП-100 на стадії розплавлення металу.

### Виклад основного матеріалу

Для систем електропостачання ДСП характерною особливістю є те, що електромагнітні коливання у контурах з дугами, які містять великі індуктивності коротких мереж, мають практично квазіперіодичний характер, тому важливо знати субчастоти у струмах і напругах системи електропостачання 35 кВ з найбільшими амплітудами, які визначають характер коливних процесів.

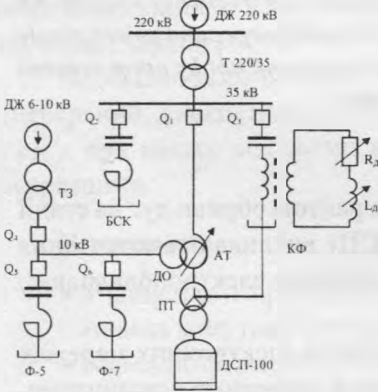


Рис. 1. Принципова схема електропостачання ДСП-100

У даному випадку розглядаються електромагнітні процеси в розробленій системі електропостачання ДСП-100 на напругах 35 та 220 кВ, яка крім традиційного електрообладнання містить керований фільтр та пристрій керування комутаціями. На рис. 1 наведено принципову схему електропостачання ДСП-100, де від ЕЕС 220 кВ через понижувальний системний трансформатор напруга подається на шини пічної підстанції 35 кВ.

Вимикачем  $Q_1$  живлення подається до ДСП через пічний трансформаторний агрегат (ПТА), який складається із послідовно увімкнених регульовального автотрансформатора (АТ) та пічного трансформатора (ПТ).

Регульовальний АТ змінює вихідну напругу і має додаткову обмотку, яка приєднується до додаткового джерела живлення (ДЖ-6-10 кВ) для збудження магнітної системи ПТА, що дозволяє увімкнути ПТА до шин пічної підстанції без стрибків струмів.

Збуджувальний трансформатор (ТЗ) призначений для погодження величини та фаз напруг додаткової обмотки АТ з додатковим джерелом живлення 6 чи 10 кВ і вмикається до додаткової обмотки вимикачем тиристорним  $Q_4$  лише під час вмикання ПТА. Між комутаціями ПТА до додаткової обмотки АТ вимикачами  $Q_5$  і  $Q_6$  вмикаються фільтрокомпенсатори Ф-5 і Ф-7 для поглинання п'ятої і сьомої гармонік струмів та компенсації реактивної енергії. Вимикачем  $Q_2$  до шин пічної підстанції вмикається батарея конденсаторів (БК), призначена для компенсації реактивної енергії при нарузі 35 кВ. Керований фільтр вищих гармонік струмів (КФ) вмикається до шин пічної підстанції вимикачем  $Q_3$  і призначений для поглинання частот струмів, генерованих дугами ДСП, які є некратні до 50 Гц, тобто інтергармонік. Цей фільтр складається із послідовно

сполучених конденсаторної батареї та фільтрового реактора з додатковою обмоткою, основна обмотка якого сполучена за схемою зірка, нейтраль якої сполучена із нейтраллю первинних обмоток ПТ. Це дозволяє здійснити незалежне пофазне регулювання параметрів керованого фільтра шляхом зміни параметрів додаткового резистора  $R_d$  та індуктивності  $L_d$  у контурах додаткової обмотки.

Характеристики та параметри відповідного силового електрообладнання схеми електропостачання ДСП наведено у табл. 1. Установлені потужності БК та батареї конденсаторів керованого фільтра взяті однакові. Розрахункову і фактичну реактивну потужність БК та конденсаторних батарей фільтрів, яку батарея може видати у мережу на основній частоті при  $U = U_{ном}$ , обчислено для першої гармоніки із врахуванням падіння напруги на реакторах фільтрів. Номінальні значення фазних напруг і струмів БК та конденсаторних батарей фільтрів отримані за значенням першої гармоніки із врахуванням величини вищих гармонік струмів, генерованих ДСП.

Таблиця 1  
Параметри та характеристики силового електрообладнання системи живлення ДСП

Координати і параметри	Трансформатори			Фільтрокомпенсатори					
	T 220/35	АТ	ІІТ	БК	Реак. БК	БК Ф-5	Реак Ф-5	БК Ф-7	Реак. Ф-7
$S_{ном}$ [МВА]	160	63	63	36,7	5,0	10,6	4,0	10,6	3,0
$U_{вн}$ [кВ]	230 12%	38,5	38,5	43,8	10,0	10,5	10,5	10,5	10,5
$U_{нн}$ [кВ]	38,5	38,5-13,6	0,6-0,2	-	-	-	-	-	-
$I_{нн}$ [А]	402	750	750	606	1000	822	1000	822	1000
$P_k$ [кВт]	525	130	171	-	-	-	-	-	-
$P_0$ [кВт]	167	43	75	-	-	-	-	-	-
$U_k$ [%]	12	12	3,7	-	-	-	-	-	-
$I_0$ [%]	0,6	0,3	0,3	-	-	-	-	-	-
$L$ [мГн]	-	-	-	-	0,6	-	1,32	-	0,67

У табл. 2 наведено попередньо вибрані параметри силового електрообладнання керованого фільтра, де значення активного опору й індуктивності, які вмикаються у контури додаткової обмотки фільтрового реактора вибрано наближено із умов забезпечення необхідних діапазонів зміни частоти поглинання і добротності, які у ході виконання досліджень уточнюються. Власна індуктивність основної обмотки фільтрового реактора КФ становить 0,6 мГн, а її активний опір – 0,02 Ом. Діапазон зміни активного опору та індуктивності у контурах

додаткової обмотки фільтрового реактора наведені у відносних одиницях до відповідних параметрів його основної обмотки.

Дослідження коливних електромагнітних процесів системи електропостачання

Таблиця 2  
Рекомендовані параметри силового електрообладнання КФ

Облади. та його парам	БК	Фільтровий реактор		Активний опір $R_d$		Індуктивність $L_d$	
		Осн. обм.	дод. обм.	пайб.	паймен.	пайб.	паймен.
Сист [МВА]	36,7	12,0		2,4		2,4	
$U_{нн}$ [кВ]	25,6	6,0	1,0	1,0		1,0	
$I_n$ [А]	750	800	2000	1500		1500	
$L$ [мГн]	-	0,46	0,013	-	-	24,0	1,5
$R$ [Ом]	-	0,05	0,001	3,0	0,1	-	-

ДСП-100 (рис.1) виконано шляхом математичного моделювання для схем з різною комплектацією силового електрообладнання та крайніх значень потужності короткого замикання системи 220 кВ [5]. Це дозволило виявити вплив КФ та фільтрів з фіксованою частотою поглинання, приєднаних до додаткових обмоток ПТА на частотні характеристики системи електропостачання ДСП.

Процеси моделювалися на інтервалі в 1 секунду з таким розрахунком, щоб отримати не менше ніж 100 точок на період.

Моделювалося 50 періодів, на інтервалі яких виконано частотний аналіз отриманих кривих струмів та напруг з використанням перетворення Фур'є.

Коливні процеси імітувалися шляхом випадкової зміни параметрів дуг ДСП за рахунок використання генератора випадкових чисел з нормальним розподілом для моделювання динамічної вольтамперної характеристики дуги змінного струму.

Шляхом математичного моделювання досліджено режими розтоплення без та з фільтрокомпенсаторами і виявлено найбільші та найменші амплітуди струмів і напруг дуг, а також струмів і напруг систем електропостачання 35 кВ і 220 кВ. Крім того, виявлено переважні частоти лінійної напруги і струмів в системі електропостачання з найбільшими амплітудами.

На рис. 2 наведено графіки миттєвих значень струмів дуги, систем 35 і 220 кВ та напруги 35 кВ фази "А" на стадії розтоплення металу на інтервалі однієї секунди звідки

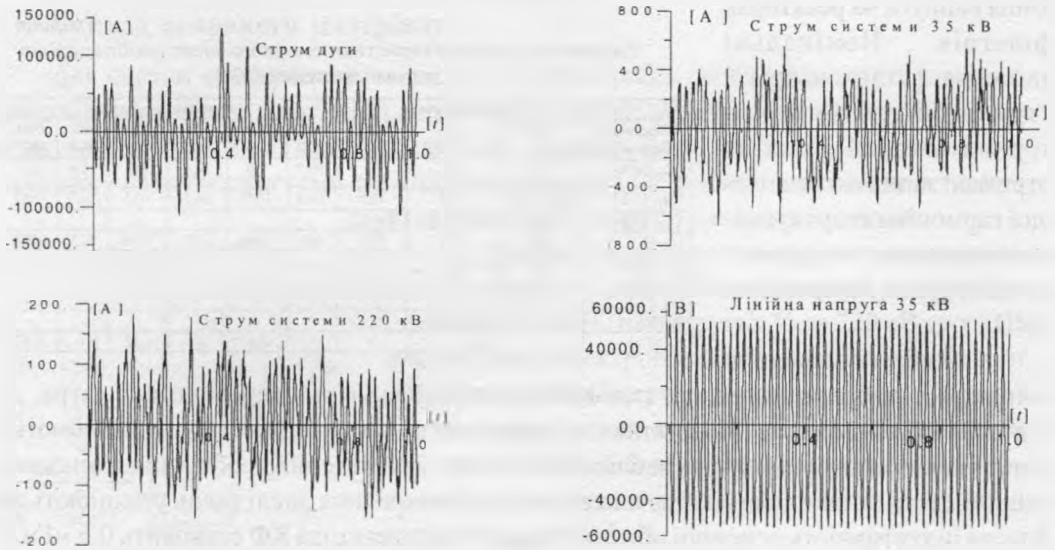


Рис. 2. Миттєві значення струмів і напруги ДСП-100 на стадії розплавлення металу

видно, що закорочення електрода на шихту супроводжуються викидами амплітуд струмів, які перевищують номінальні значення майже у два рази.

Вказані викиди струмів печі трансформуються у системи 35 та 220 кВ, зі змінною послідовністю викидів за рахунок різних груп сполучення обмоток трансформаторів.

Амплітуди струмів у системі 35 кВ перевищують номінальні струми первинних обмоток пічного трансформатора у 1,6–1,7 рази.

Амплітуди викидів струмів системи 220 кВ не перевищують номінальних значень

Таблиця 3  
Максимальні значення координат системи живлення ДСП під час розтоплення

Схема живлення ДСП	Sk1	Найбільші значення координат режимів системи живлення ДСП						
		I <sub>135</sub>	I <sub>122</sub>	U <sub>135кВ</sub>	I <sub>135кВ</sub>	I <sub>220кВ</sub>	I <sub>6кВ</sub>	U <sub>6кВ</sub>
ЗБК	Макс.	2,12	1,68	1,12	1,3	0,38	1,48	1,09
	Мін.	2,13	1,69	1,09	1,34	0,4	1,42	1,07
ЗКФ	Макс.	2,4	2,44	1,1	1,63	0,6	1,92	1,29
	Мін.	2,33	2,48	1,09	2,08	0,64	1,91	1,33
ЗФ-5 1Ф-7	Макс.	2,44	2,49	1,04	2,49	0,75	1,8	1,02
	Мін.	2,47	2,53	1,04	2,53	0,76	1,68	1,03

первинних обмоток системного трансформатора (ТС) за рахунок того, що потужність ТС перевищує потужність пічного трансформатора утричі.

У табл. 3 наведено

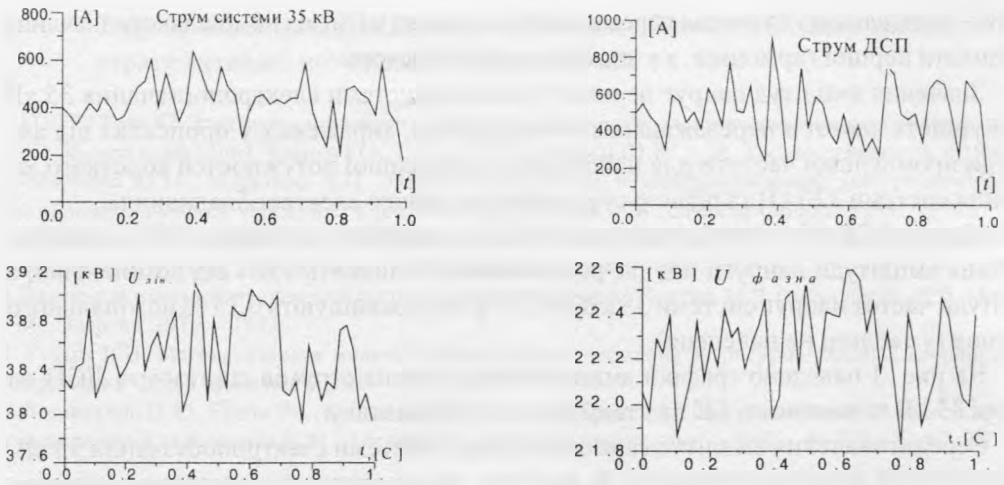


Рис. 3. Струми фази "В" системи і ДСП та напруги 35 кВ з приєднаною БК до шин півної підстанції

найбільші значення кратностей амплітуд координат режимів системи електропостачання ДСП на різних рівнях напруги (напруги дуги 35 кВ та 220 кВ), на інтервалі однієї секунди на стадії розплавлення шихти. Періодичні закорочення електродів на шихту викликають амплітуди струмів дуг печі, які перевищують номінальні значення у 2,1–2,47 раза, викликаючи викиди амплітуд струмів в системі електропостачання на інших рівнях напруг, які перевищують номінальні у 2,53 раза.

У БК, приєднаних до шин півної підстанції, викиди амплітуд струмів перевищують номінальні в 1,92 раза, перевантажуючи їх на тривалому інтервалі часу, а напруги на 33%, що необхідно враховувати під час їх проєктування.

У табл. 4 наведено результати частотного аналізу графіків миттєвих значень координат режимів силового електрообладнання системи електропостачання 35 кВ та ДСП-100 окремо для кожної із фаз за наявності фільтрокомпенсувальних кіл.

У лівих колонках подано значення координат першої гармоніки у частках від номінальних значень, а у

Таблиця 4

Характеристика субчастот системи електропостачання ДСП

Компл. обл-ня	S <sub>к1</sub>	Струми дуг печі					
		Фаза А		Фаза В		Фаза С	
		I <sub>а</sub>	[%]/Tu	I <sub>в</sub>	[%]/Tu	I <sub>с</sub>	[%]/Tu
З БК	Макс	0,62	21,5 / 14	0,67	22,05 / 3	0,67	19,5 / 5
	Мін	0,63	21,8 / 14	0,675	22,13 / 3	0,674	19,4 / 5
З КФ	Макс	0,89	17,9 / 14	0,94	20,3 / 5	0,94	19,02 / 5
	Мін	0,9	17,9 / 14	0,96	18,74 / 5	0,95	16,0 / 5
З Ф-5 і Ф-7	Макс	0,89	17,9 / 14	0,94	20,3 / 5	0,94	19,02 / 5
	Мін	0,9	17,9 / 14	0,96	18,74 / 5	0,95	16 / 5
Напруги дуг печі							
З БК	Макс	1,01	13 / 18	0,99	13,3 / 18	0,9	15,6 / 18
	Мін	1,01	16 / 18	0,99	13,3 / 18	0,9	15,7 / 18
З КФ	Макс	1,125	16,8 / 37	1,07	13,1 / 8	1,0	15,5 / 18
	Мін	1,125	16,8 / 37	1,07	13,06 / 8	1,0	15,5 / 18
З Ф-5 і Ф-7	Макс	1,125	12,5 / 37	1,07	13 / 8 (18)	1,0	15,5 / 18
	Мін	1,125	16,8 / 37	1,07	13,1 / 8 (18)	1,0	15,45 / 18
Струми системи електропостачання 35 кВ							
З БК	Макс	0,4	31,1 / 14	0,39	33,7 / 3	0,38	31,8 / 2 (37)
	Мін	0,4	31,2 / 14	0,4	28 / 3	0,38	29 / 39 (10)
З КФ	Макс	0,48	36 / 14	0,69	32,8 / 5	0,6	29,8 / 10
	Мін	0,48	35,5 / 14	0,69	32,2 / 5	0,6	29,4 / 10
З Ф-5 і Ф-7	Макс	0,93	20,9 / 14	0,99	22,4 / 5	0,92	17,4 / 10
	Мін	0,92	20,9 / 14	0,95	22,5 / 5	0,91	17,5 / 10
Лінійні напруги системи електропостачання 35 кВ							
З БК	Макс	0,99	0,29 / 41	0,99	0,37 / 39	0,99	0,475 / 39
	Мін	1,0	0,34 / 41	0,99	0,43 / 39	0,99	0,56 / 39
З КФ	Макс	1,013	0,46 / 39	1,012	0,51 / 39	1,012	0,32 / 36
	Мін	1,012	0,54 / 39	1,011	0,53 / 39	1,014	0,39 / 36
З Ф-5 і Ф-7	Макс	1,012	0,4 / 36	1,012	0,44 / 39	1,012	0,63 / 39
	Мін	1,0	0,48 / 36	1,0	0,62 / 39	1,005	0,75 / 39

правих – у чисельнику значення переважаючих амплітуд у (%) від номінального значення координати першої гармоніки, а у знаменнику її субчастота.

Значення амплітуд напруг першої гармоніки системи електропостачання 35 кВ та сукупність частот з переважаючими амплітудами, виражених у процентах від амплітуди промислової частоти для найбільшої і найменшої потужностей короткого замикання системи 220 кВ та різною сукупністю силового електрообладнання.

Напруги 35 кВ містять частоти 36–41 Гц, причому на частоті 39 Гц середня величина амплітуди напруги під час розплавлення становить 1,8% від номінальної, а амплітуди частот напруг системи 35 кВ до 20 Гц не перевищують 0,15 % номінального значення (у таблиці не наведено).

На рис. 3 наведено графіки зміни діючих значень струмів системи та ДСП на напрузі 35 кВ за наявності БК на стадії розтоплення металу.

Середні значення амплітуд гармонік струмів системи електропостачання 35 кВ, а також розмах амплітуд струмів та їх частоти, звідки видно, що частотний діапазон струмів системи електропостачання знаходиться у межах від 1 Гц до 39 Гц з амплітудами 18,4% – 36% від номінального значення.

Треба зазначити, що найменші значення амплітуди (17–22 %) струмів з частотами 5–14 Гц існують у системі електропостачання з приєднаними до виводів додаткової обмотки регульовального автотрансформатора фільтрами п'ятої чи сьомої гармонік.

Аналогічні результати для струмів системи 220 кВ, які містять частоти від 3 Гц до 14 Гц, а в окремих фазах 37 Гц – 39 Гц, при цьому розмах амплітуд цих струмів досягає 33 % від амплітуди першої гармоніки. Аналіз переважаючих субчастот струмів дуг ДСП показав, що вказані частоти лінійних струмів систем 35 кВ та 220 кВ визначаються частотами струмів дуг ДСП.

Важливо зазначити, що значення амплітуд струмів дуг ДСП залежать від структури КФ та місця їх приєднання. Наприклад, наявність БК забезпечує збільшення амплітуди струмів першої гармоніки дуг печі приблизно на 5–6 % порівняно з живленням ДСП без БК за рахунок компенсації реактивної складової струму ДСП. Використання КФ дозволяє збільшити струм печі в середньому до 25% за рахунок компенсації реактивної потужності з одночасним збільшенням напруг дуг. Це означає, що без змін коефіцієнта трансформації пічного трансформаторного агрегату, підняттям напруги за допомогою КФ, піч споживає більшу потужність ніж з БК.

Частоти напруг дуг знаходяться у діапазоні від 8 Гц до 37 Гц з амплітудами 13 – 17 % від номінальної амплітуди основної частоти. Частота з переважаючою амплітудою напруги дуги є 18 Гц.

## Висновки

1. Коливні процеси призводять до зменшення амплітуди струму основної частоти, що погіршує технічні показники ДСП, зокрема зменшується потужність дуг.
2. Склад субчастот струмів та напруг систем електропостачання 35 та 220 кВ визначається виключно субчастотами струмів дуг, які залежать від динаміки зміни характеристик дуг печі.
3. З погляду електричних режимів для фільтрокомпенсації оптимальним є використання КФ або фільтрів з фіксованою частотою поглинання на 5-ту й

7-му гармоніки, які приєднані до додаткових обмоток ПТА, що дозволяє знизити втрати активної потужності у мережі 35 кВ.

1. ГОСТ 13109-87. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. Взамен ГОСТ 13109-67. - Введ. 01.01.89. - М.: Изд-во стандартов. - 1988.
2. Миронов Ю.М., Миронова А.Н. Электрооборудование и электроснабжение электротермических, плазменных и лучевых установок: Учеб. пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат. 1991. - 376 с.
3. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях: 3-е изд. перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат. - 2000. - 225 с.
4. Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения / Под ред. М.Я. Смелянского и Р.В. Минеева. - М.: Энергия, 1975. - 184 с.
5. Гудым В.И. Математическая модель систем электроснабжения в контурно-узловых координатах // "Энергетика" Изв-я вузов и ЭО СНГ. - 1997. №7-8. - С. 38-41.
6. Лозинський О.Ю., Гудим В.І., Костинюк Л.Д. Аналіз моделей дуги і дослідження адекватності процесів у модельованій та реальній ДСП // Вісник ДУ "Львівська політехніка" - 2000. - № 400. - С. 87-92.

**В.Галандзій, О.Гошовська, І.Дронюк, Ж.Поплавська**  
Національний університет "Львівська політехніка"

УДК 519.10+338.242.2

## АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ СИНЕРГІЧНИХ ЕФЕКТІВ НА ПІДПРИЄМСТВІ

© Галандзій В., Гошовська О., Дронюк І., Поплавська Ж., 2003

*Представлено автоматизовану систему для проведення аналізу значень економічних показників підприємств за заданою математичною моделлю, яка описує процес об'єднання підприємств із врахуванням синергічних ефектів.*

*An automatic system is presented for performing analysis of economic indexes value of factories based on mathematical model given which describes merger of factories taking into consideration synergical effects.*

### Вступ

Довгий час людство користувалось лінійними математичними моделями, що лише приблизно описують зовнішній світ. У межах лінійних моделей неможливо моделювати катастрофічні явища, що часто трапляються в реальному житті. Бурхливий розвиток