

І. В. СТЕЦЕНКО, д-р техн. наук, професор
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси
Я. С. БЕДЕРАК, інженер
ПАТ «Азот», м. Черкаси

ПОБУДОВА БАГАТОФАКТОРНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА ХІМІЧНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

В статье рассмотрено применение метода группового учета аргументов для построения многофакторных математических моделей на химическом производстве. Предложено учитывать при построении моделей не только структуру и текущие значения параметров технологического процесса, но и его динамику. Выбраны независимые внешние критерии алгоритма самоорганизации для поиска оптимальной модели.

У статті розглянуто застосування методу групового урахування аргументів для побудови багатofакторних математичних моделей енергоспоживання на хімічному виробництві. Запропоновано враховувати при побудові моделей не тільки структуру та поточні значення параметрів технологічного процесу, але й його динаміку. Вибрані незалежні зовнішні критерії алгоритму самоорганізації для пошуку оптимальної моделі.

Вступ

Для встановлення так званих «стандартів» споживання енергії, що використовуються в системах оперативного контролю використання енергії, необхідно будувати модель споживання палива чи енергії деяким технологічним об'єктом в залежності від основних чинників, що суттєво впливають на витрату енергії. У сучасній практиці, як зарубіжній, так і вітчизняній, в системах контролю і планування енергоспоживання пропонується використовувати «стандарти» енергоспоживання у вигляді констант чи найпростіших лінійних залежностей від обсягів виробництва. В умовах хімічного виробництва такі «стандарти» не відповідають реальним процесам, оскільки витрати енергії здійснюються не тільки на постачання реагентів, але й на хімічні реакції, наприклад на нагрівання чи охолодження реагентів.

У роботі [1] описана методика побудови математичної моделі споживання палива чи енергії методами самоорганізації моделей. Самоорганізація моделей дозволяє при мінімальній участі дослідника одержувати модель оптимальної складності за заданою множиною моделей-претендентів та заданими критеріями якості моделі [2]. На відміну від звичайних методів регресії методи самоорганізації моделей дозволяють враховувати множину факторів-претендентів замість фіксованого переліку факторів.

Специфіка хімічного виробництва полягає в необхідності враховувати не тільки структуру виробництва, але й динаміку процесів, які відбуваються на виробництві. Найбільш яскраво це показано на прикладі крупнотонажного виробництва аміаку [3]. Сучасний процес одержання аміаку ґрунтується на його синтезі з азоту та водню.

Опис технологічного процесу

Природний газ потрапляє в цех з газорозподільної станції. Очищений від газового конденсату і рідких вуглеводнів природний газ спрямовується на всмоктування відцентрових компресорів [3]. Від компресорів природний газ потрапляє на агрегати підготовки синтез-газу. Потім – направляється в підігрівач конвекційної зони первинного риформінгу. Очищений природний газ спрямовується в змішувач, де змішується з водяною парою. Тепло, необхідне для проведення процесу конверсії природного газу при заданому температурному режимі, утворюються за рахунок спалювання газу в пламневих пальниках печі.

У реактор вторинного риформінгу разом з риформованим газом надходить технологічне повітря, попередньо підігрите до температури не більше 500 °С в підігрівачі

трубчатої печі. Після теплообмінника перед надходженням на каталізатор парогазова суміш проходить через зволожувач, де охолоджується при цьому до температури 330–400 °С.

Парогазова суміш з реактора з температурою 210–249 °С направляється в кип'ятильники розчину моноетаноламіну (МЕА). Технологічний конденсат після сепаратора надходить у фільтри, де очищується від механічних домішок.

Очищений конвертований газ після моноетаноламінової очистки містить ще сліди диоксиду вуглецю, що є отрутою для каталізатора синтезу аміаку. Видалення з газу залишкових оксидів вуглецю (СО і СО₂) здійснюється відновленням їхнім воднем на нікелевому каталізаторі з утворенням метану.

Схема технологічного процесу одержання аміаку представлена на рис. 1.

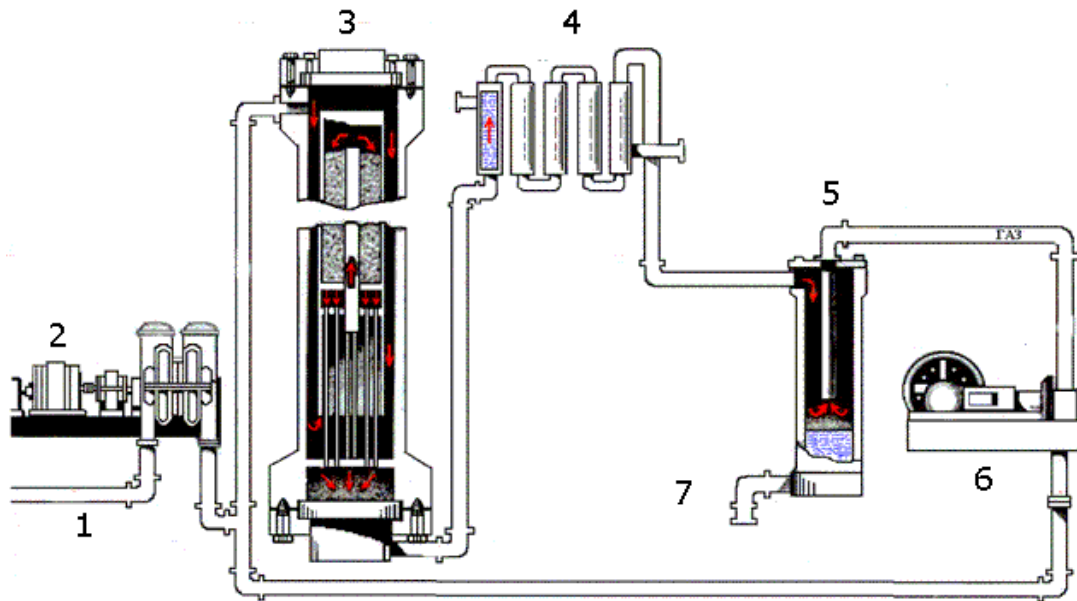


Рис. 1. Схема технологічного процесу одержання аміаку з азотоводородної суміші:
1 – азотоводнева суміш, 2 – турбокомпресор, 3 – колона синтезу, 4 – холодильник,
5 – сепаратор, 6 – циркуляційний насос, 7 – аміак, що йде на склад

Синтез-газ із відділення підготовки синтез-газу з тиском 2,25–2,43 МПа і температурою не більш 45 °С надходить в загальний колектор синтез-газу. Із загального колектора синтез-газ надходить на всмоктування компресора, в якому здійснюється трьохступінчасте стиснення синтез-газу до робочого тиску не більш 32 МПа.

Після кожної ступені стиснення синтез-газу виконується охолодження газу у водяних холодильниках до температури не більше ніж 45 °С і відокремлення масла і сконденсованої вологи від газу в сепараторах.

Синтез-газ подається в циркуляційну систему синтезу аміаку. Суміш синтез-газу і циркуляційного газу з тиском не більше 32 МПа направляється у випарник, де охолоджується до температури від мінус 10 до плюс 15 °С за рахунок випаровування рідкого аміаку в міжтрубному просторі випарника. Із випарника газова суміш проходить сепаратор, де відбувається виділення сконденсованого рідкого аміаку. Далі газ поступає в міжтрубний простір теплообмінника, де нагрівається за рахунок тепла газу, який надходить після сепаратора первинної конденсації. Циркуляційний газ підігрівається до температури не більш 180 °С і за допомогою циркуляційних насосів направляється в колону синтезу аміаку. Колона синтезу аміаку представляє собою вертикальний циліндричний апарат, призначений для проведення реакції синтезу аміаку, з встановленою всередині насадкою, завантаженою двома шарами залізного каталізатора.

Первинний аналіз даних

У цеху встановлені два однакові за потужністю аміачні поршневі компресори продуктивністю 25 тон аміаку за годину. Основними приймачами електричної енергії в цеху є тихохідні потужні синхронні двигуни аміачних компресорів потужністю майже 7000 кВт, а також турбокомпресорів потужністю 1000÷5000 кВт, що подають до них повітря та природний газ.

Величина витрат електроенергії в цеху за деякий період залежить від багатьох чинників, основними з яких є обсяг виробництва аміаку та споживання природного газу, середня температура повітря, що подається до аміачних компресорів, температура зворотної води в системах охолодження компресорів тощо.

Методом експертних оцінок та методом побудови діаграми Ісікави [4] визначено фактори, від яких залежить виробіток аміаку та споживання електроенергії. Такими факторами є споживання природного газу, середньодобова температура повітря, температура зворотної води та багато інших факторів. Жоден з факторів не визначає повністю величину виробітку продукції та споживання електроенергії.

Діаграма Ісікави для цеху з виробництва аміаку наведена на рис. 2. Мета побудови діаграми є виявлення максимально можливого числа факторів, від яких залежить споживання електроенергії.

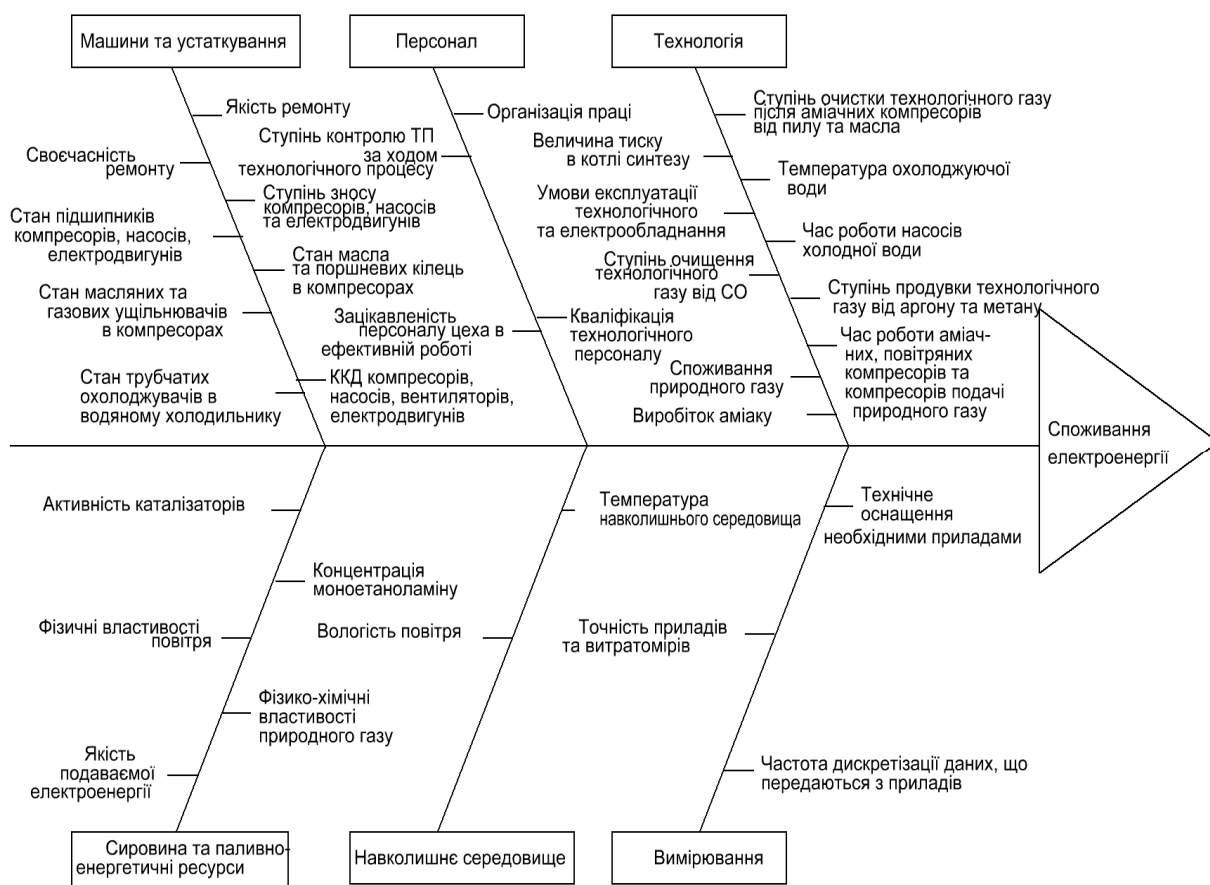


Рис. 2. Причинно-наслідкова діаграма Ісікави з неефективного споживання електроенергії в цеху з виробництва аміаку

Для формалізації цієї процедури доцільно розділити усі фактори на декілька груп та відмітити це на діаграмі відповідними гілками. Ділення цих факторів проводиться по шести напрямкам. У деяких закордонних публікаціях цю процедуру представляють у вигляді комбінації букв РМММЕ, утворених від англійських слів: Personal (персонал, люди);

Machine (машина, устаткування, верстати); Material (матеріал, сировина); Method (метод, технологія, режим); Measurement (вимірювання); Environment (навколишнє середовище).

Фактори, які враховуються в математичній моделі, обираються в залежності від сили їх впливу на величину електроспоживання та від складності оцінювання кожного фактору. Визначити вплив усіх факторів на величину споживання електроенергії не представляється можливим, тому визначені основні фактори, які впливають на величину електроспоживання крупнотонажного цеху з виробництва аміаку хімічного підприємства: щогодинні величини виробітку аміаку (змінна x) та витрат природного газу (змінна z), які вимірювались спеціальними датчиками та накопичувались протягом 60 робочих днів весняного сезону. Таблиця вхідних даних має вигляд, представлений у табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні дані для побудови математичної моделі

Дата	Час	Виробіток аміаку x , тонн	Споживання природного газу z , 1000 м ³ /годину	Спожита електроенергія Y , 1000 кВт·год
20.../.../01	00:00:00	39,699	45,211	31,988
20.../.../01	01:00:00	39,292	45,182	32,005
20.../.../01	02:00:00	39,644	45,357	31,932
20.../.../01	03:00:00	39,929	45,122	31,923
20.../.../01	04:00:00	39,684	45,481	32,105
20.../.../01	05:00:00	39,967	45,782	32,056
20.../.../01	06:00:00	39,422	45,761	32,063
20.../.../01	07:00:00	43,174	45,602	32,098
20.../.../01	08:00:00	42,055	45,608	31,971
20.../.../01	09:00:00	40,449	45,023	31,953
20.../.../01	10:00:00	41,385	44,973	31,860
....
20.../.../31	17:00:00	46,907	53,037	35,576
20.../.../31	18:00:00	46,923	52,979	35,532
20.../.../31	19:00:00	46,109	52,780	35,521
20.../.../31	20:00:00	46,772	52,693	35,491
20.../.../31	21:00:00	46,583	52,644	35,501
20.../.../31	22:00:00	46,821	52,893	35,538
20.../.../31	23:00:00	46,865	52,657	35,504

Дослідження автокореляції даних середньогодинних значень як виробітку аміаку, так і споживання електроенергії показали, що існує значний зв'язок поточних значень з попередніми (приклад розрахунку автокореляції щогодинних значень активної енергії наведений в табл. 2). Обираючи дані, які присутні з коефіцієнтом автокореляції, більшим за 0,75, приходимо до висновку, що суттєвий вплив на результуючу ознаку здійснюють не тільки поточні, але й попередні значення незалежних змінних, що дозволяє враховувати динаміку змінювання факторів.

Кожне значення нормованої автокореляційної функції щогодинних значень активної енергії насосної станції знаходиться згідно [5].

Пошук моделі оптимальної складності

Для побудови математичної моделі обсягу споживання електроенергії в цеху з виробництва аміаку використовується однорядний (комбінаторний) алгоритм самоорганізації моделей, реалізація якого засобами програмного забезпечення Mathcad 2000 Professional описана в [6]. Використовувались такі базисні функції множини моделей-претендентів: $1, x_0, x_{-1}, x_{-2}, z_0, z_{-1}, z_{-2}$. Модель вибирається з множини моделей-претендентів послідовним відбором спочатку за критерієм мінімуму зсуву, потім – за критерієм регулярності. Якість

моделі оцінюється за відхиленням від табличних даних на екзаменаційній послідовності даних.

Таблиця 2

Матриця нормованої автокореляційної функції щогодинних значень активної енергії насосної станції

–	–	1	2	3	4	5	6	...	23
–	–	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	...	23:00
1	0:00	1,000	0,992	0,887	0,889	0,898	0,830	...	0,408
2	1:00		1,000	0,937	0,938	0,945	0,874	...	0,443
3	2:00			1,000	0,994	0,998	0,917	...	0,488
4	3:00				1,000	0,993	0,913	...	0,485
5	4:00					1,000	0,928	...	0,488
6	5:00						1,000	...	0,551
...								1,000	...
24	23:00								1,000

За результатами дослідження побудовано 112 моделей, що включають або не включають попередні значення незалежних змінних, враховують або не враховують характерні точки. У публікації [1] описані результати побудови математичної моделі енергоспоживання з використанням відносно невеликої кількості даних (погодинних значень за 10÷15 діб) та евристики, що полягає у додаванні до перевірконої послідовності даних характерних точок., наприклад, точки з координатами (0;0;0), що відповідає ситуації, коли відсутнє споживання сировини і електричної енергії, а значить відсутнє виробництво продукції. Додавання такої точки сприяє підвищенню точності математичного моделювання досліджуваних процесів на невеликій кількості даних. Деякі з моделей-претендентів наведені в табл. 3. Найменшу похибку 0,795% має модель $Y=10,761 + 0,269x_{-1} + 0,137z_{-2} + 0,097z_0$.

Таблиця 3

Визначення найліпшої математичної моделі електроспоживання $Y=f(x, z)$

№ з/п	Рівняння моделі	Похибка моделі, %
Експеримент з двома попередніми значеннями без включення нульової точки		
1	$Y=13,104 + 0,183x_{-1} + 0,546z_{-2} - 0,276z_{-1}$	1,154
2	$Y=15,639 + 0,381x_{-2} + 0,041z_0$	1,198
3	$Y=13,726 + 0,301x_{-2} - 0,027x_{-1} + 0,211z_{-2} - 0,037z_{-1}$	1,142
4	$Y=11,217 + 0,262x_{-1} + 0,232z_{-1}$	0,809
5	$Y=10,761 + 0,269x_{-1} + 0,137z_{-2} + 0,097z_0$	0,795
6	$Y=11,676 + 0,319x_{-1} + 0,171z_0$	0,838
7	$Y=14,8 + 0,304x_{-1} + 0,139x_0$	0,973
8	$Y=16,796 + 0,402x_{-2}$	1,283
Експеримент з попередніми значеннями з включенням нульової точки		
9	$Y=9,364 + 0,314x_{-1} + 0,219z_0$	0,873
10	$Y=9,485 + 0,306x_{-1} + 0,016x_0 + 0,209z_0$	0,870
11	$Y=7,647 + 0,178x_0 + 0,375z_{-1}$	0,932
12	$Y=12,034 + 0,374x_{-2} - 0,027x_{-1} - 0,064x_0 + 0,172z_{-1}$	0,974
13	$Y=9,608 + 0,101x_{-1} + 0,487z_{-2} + 0,172z_0$	1,325
Експеримент без попередніх значень без включення нульової точки		
14	$Y=2,809 + 0,776x_0 + 0,166z_0 - 0,00547x_0^2$	1,177

Вибір зовнішніх критеріїв алгоритму самоорганізації моделей

Важливим кроком, який необхідно зробити до початку моделювання будь-якого процесу з застосуванням методів самоорганізації, є вибір зовнішніх критеріїв для виявлення кращих моделей.

Вибір зовнішнього критерія здійснюється дослідником в залежності від задачі, яка розв'язується. Досвід практичного застосування методів самоорганізації свідчить, що найбільш широке застосування мають так звані критерій регулярності Δ^2 (B) і критерій мінімуму зсуву $n_{зсуву}^2$ [2].

Для вибору оптимальної моделі електроспоживання доцільно застосовувати також такі критерії, як критерій точності короткочасного прогнозу Δ^2 (C) та критерій простоти моделі $K_{пр}$ [2]. $K_{пр}$ приймається рівним 1, якщо модель містить тільки одне значення незалежної змінної, $K_{пр} = 2$, якщо модель містить два значення незалежної змінної, $K_{пр} = 3$, якщо модель містить три значення незалежної змінної і $K_{пр} = 4$, якщо модель містить чотири значення незалежної змінної. Ці вищенаведені критерії незалежні один від одного та мають рівну вагу. Тому для виявлення кращої моделі доцільно застосовувати або адитивний, або мультиплікативний комплексний критерій [7].

Цільові функції для кожної моделі будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned} K_{пр} &\rightarrow \min \\ RR &\rightarrow \min \\ \Delta^2(B) &\rightarrow \min \\ n_{зсуву}^2 &\rightarrow \min \end{aligned}$$

Математичні моделі та критерії якості для побудови оптимальної математичної моделі електроспоживання наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Порівняння моделей, отриманих на різних множинах моделей-претендентів та на різних поділах на таблиці даних

Математична модель електроспоживання $Y=f(x, z)$	Критерії якості для побудови оптимальної математичної моделі електроспоживання			
	Δ^2 (C)	$K_{пр}$	Δ^2 (B)	$n_{зсуву}^2$
Експеримент з двома попередніми значеннями без включення нульової точки				
$Y=13,104 + 0,183x_{-1} + 0,546z_{-2} - 0,276z_{-1}$	0,0103	3	$4,836 \cdot 10^{-4}$	$5,955 \cdot 10^{-5}$
$Y=15,639 + 0,381x_{-2} + 0,041z_0$	0,0026	2	$3,325 \cdot 10^{-4}$	$8,837 \cdot 10^{-5}$
$Y=13,726 + 0,301x_{-2} - 0,027x_{-1} + 0,211z_{-2} - 0,037z_{-1}$	0,0043	3	$3,858 \cdot 10^{-4}$	$1,093 \cdot 10^{-4}$
$Y=11,217 + 0,262x_{-1} + 0,232z_{-1}$	0,0040	2	$1,408 \cdot 10^{-4}$	$4,286 \cdot 10^{-5}$
$Y=10,761 + 0,269x_{-1} + 0,137z_{-2} + 0,097z_0$	0,0035	3	$1,228 \cdot 10^{-4}$	$1,461 \cdot 10^{-4}$
$Y=11,676 + 0,319x_{-1} + 0,171z_0$	0,0021	2	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,951 \cdot 10^{-5}$
$Y=14,8 + 0,304x_{-1} + 0,139x_0$	0,0013	2	$1,912 \cdot 10^{-4}$	$6,232 \cdot 10^{-5}$
$Y=16,796 + 0,402x_{-2}$	0,0027	1	$5,903 \cdot 10^{-4}$	$2,304 \cdot 10^{-4}$
Експеримент з попередніми значеннями з включенням нульової точки				
$Y=9,364 + 0,314x_{-1} + 0,219z_0$	0,0023	2	$2,801 \cdot 10^{-4}$	$4,887 \cdot 10^{-5}$
$Y=9,485 + 0,306x_{-1} + 0,016x_0 + 0,209z_0$	0,0019	3	$3,329 \cdot 10^{-4}$	$2,065 \cdot 10^{-4}$
$Y=7,647 + 0,178x_0 + 0,375z_{-1}$	0,0067	2	$2,377 \cdot 10^{-4}$	$1,318 \cdot 10^{-4}$
$Y=12,034 + 0,374x_{-2} - 0,027x_{-1} - 0,064x_0 + 0,172z_{-1}$	0,0026	4	$5,949 \cdot 10^{-4}$	$4,484 \cdot 10^{-4}$
$Y=9,608 + 0,101x_{-1} + 0,487z_{-2} + 0,172z_0$	0,0106	3	$7,322 \cdot 10^{-4}$	$1,289 \cdot 10^{-5}$
Експеримент без попередніх значень без включення нульової точки				
$Y=2,809 + 0,776x_0 + 0,166z_0 - 0,00547x_0^2$	0,0075	2	$3,028 \cdot 10^{-4}$	$2,574 \cdot 10^{-4}$

З вищевказаних моделей дві мають найкраще співвідношення критеріїв:

$$Y=11,676 + 0,319x_{-1} + 0,171z_0,$$

$$Y=14,8 + 0,304x_{-1} + 0,139x_0.$$

Порівняємо ці моделі, використовуючи відносні відсоткові значення від максимального значення величин критеріїв якості моделей (табл. 5) та мультиплікативний критерій Π , що розраховується за формулою [7]:

$$\Pi = \prod_{i=1}^4 F_i(X),$$

де $F_i(x)$ – нормовані значення критеріїв.

Таблиця 5

Вибір моделі за мультиплікативним критерієм

Критерії якості моделі	$Y=11,676 + 0,319x_{-1} + 0,171z_0$		$Y=14,8 + 0,304x_{-1} + 0,139x_0$	
	Абсолютне значення моделі	Нормоване значення моделі (у відсотках до максимального)	Абсолютне значення моделі	Нормоване значення моделі (у відсотках до максимального)
$K_{пр}$	2	100	2	100
RR	0,0021	100	0,013	61,9
$\Delta^2(B)$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	99,37	$1,912 \cdot 10^{-4}$	100
$n_{зсуву}^2$	$1,951 \cdot 10^{-5}$	31,3	$6,232 \cdot 10^{-5}$	100
Мультиплікативний критерій Π	–	31102810	–	61900000

Найменше значення мультиплікативного критерію відповідає найліпшій моделі. Отже, як слідує з наведеної таблиці, найліпшою моделлю електроспоживання, яка рекомендується для використання в цеху з виробництва аміаку, є така модель: $Y=11,676 + 0,319x_{-1} + 0,171z_0$.

Висновки

Результати дослідження свідчать, що в умовах хімічного виробництва для побудови математичної моделі енергоспоживання потрібно враховувати не тільки структуру та поточні значення параметрів технологічного процесу, але й динаміку технологічного процесу. Урахування факторів, що описують динаміку технологічного процесу, дозволяє забезпечити значення відхилення модельованих значень від істинних, що не перевищує 1%. Методика побудови математичної моделі енергоспоживання, яка розроблена, може використовуватись у якості складового компонента систем контролю і планування енергоспоживання для короткотривалого прогнозування енергоспоживання, відновлення даних, контролю правильності ведення технологічного процесу на виробничих об'єктах.

Список літератури

1. Находов В. Ф. Застосування методів самоорганізації математичних моделей енергоспоживання для встановлення «стандартів» в системах оперативного контролю енергоефективності / В. Ф. Находов, І. В. Стеценко, Я. С. Бедрак // Энергосбережение· Энергетика · Энергоаудит. – 2010. – № 5. – С. 23–33.
2. Ивахненко А. Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей / А. Г. Ивахненко, Й. А. К. Мюллер – Киев: Наукова думка, 1985. – 221с.

3. Плановский Л. И. Процессы и аппараты химической технологии / Л. И. Плановский, В. Ж. Рамм., С. З.Каган – М: Высшая школа, 1968. – 848 с.
4. Шишкин И. Ф. Метрология, стандартизация и управление качеством. Учеб. для вузов / Под ред. акад. Н. С. Соломенко. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 342 с.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
6. Стеценко І. В. Моделювання систем: навч. посібник / І. В. Стеценко; М-во освіти і науки України. Черкас.держ.технол.ун-т. – Черкаси: ЧДТУ, 2010. – 399 с.
7. Горбунов В. М. Теория принятия решений: Учебное пособие / В. М. Горбунов. – ГОУВПО «Национальный исследовательский томский политехнический университет». – 2010. – 67 с.

CONSTRUCTION OF MULTIFACTOR MATHEMATICAL MODELS OF ENERGY CONSUMPTION IN CHEMICAL PRODUCTION

I. V. STETSENKO, Doctor of Engineering, Professor
Ya. S. BEDERAK, Engineer

The paper discusses application of the method of group consideration of arguments for construction of multifactor mathematical models in chemical production. It suggests that in construction of models consideration should be given not only to the structure and current values of parameters of the technological process, but also to its dynamics. It selects independent external criteria of the self-organization algorithm for search of optimal model.

Поступила в редакцию 01.04 2013 г.