

5. Синчук О.Н. Совершенствование методов расчета электрических нагрузок при проектировании и модернизации систем электроснабжения железорудных предприятий / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, Р.А. Пархоменко // Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. №1/2013 (78). С. 28-32.

6. Синчук И.О. Потенциал электроэнергоэффективности и пути его реализации на производствах с подземными способами добычи железорудного сырья. Монография / И.О. Синчук, Э.С. Гузов, А.Н. Яловая, С.Н. Бойко // под ред. докт. техн. наук, профессора О.Н. Синчука. – Кременчук: Изд. ЧП Щербатых А.В. – 2015. – 296 с.

7. Синчук О.Н. Оценка состояния и определения тактики повышения эффективности работы участковых подстанций железорудных шахт / О.Н. Синчук, С.Н. Лесной, Р.А. Пархоменко, А.Н. Яловая // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – Кіровоград, 2012. – Випуск 25, частина II. – С.248 – 254.

8. Удовенко В.А. Переход на одноставочные тарифы, дифференцированные по зонам времени / В.А. Удовенко // Энергетика и электрификация. – 1998. – №4. – С.42-44.

9. Синчук О.Н. «Холодный» резерв недогруженных силовых трансформаторов – путь повышения эффективности электроснабжения железорудных комбинатов / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Р.А. Лесной, А.Н. Яловая // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Кіровоград, 2012. – випуск 25, частина II. – С.74-79.

Рукопись поступила в редакцию 10.03.16

УДК 621.311:621.331

В.П. РОЗЕН, д-р техн.наук, проф., Я.М. ДЕМЧИК, аспірант

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

В даній статті досліджується використання методів експоненціального згладжування прогнозування споживання електричної енергії підприємства харчової галузі. Основною метою являється дослідження впливу експоненціального згладжувань на прогнозування електроспоживання та точність при різних показниках згладжування. Використання сучасних способів збору інформації дозволяє приймати точні рішення. В цій статті представлено різні методи прогнозування з використанням статистичних даних отриманих за допомогою пристроїв збору даних. Дане дослідження дозволить використовувати методи в простому прогнозуванні при використанні статистичних інструментів. Результати можуть використовуватися в електроенергетиці при попередньому прогнозуванні споживання електроенергії. Запропоновані методи показують як правильно використовувати моделі експоненціального згладжування та які з них являються найбільш точнішими.

Ключові слова: електроспоживання, підприємство харчової галузі, експоненціальне згладжування, прогнозування

Проблема та її зв'язок за науковими і практичними завданнями. У сучасних умовах одним з важливих завдань є формування відносин між суб'єктами енергоринку, зокрема між споживачем та енергопостачальною компанією. Прогнозування електроспоживання харчових підприємств є одним моментів планування діяльності всього підприємства, а також харчової промисловості в цілому. Для виробника електричної енергії прогноз потрібний для оптимізації поставки і резервування електроенергії, проведення профілактичних робіт і забезпечення безпеки функціонування електроенергетичної системи (ЕЕС). Споживачу прогноз необхідний для мінімізації похибок, пов'язаних з платою штрафів при перевищенні лімітів по потужності і з передплатою за заявлену, але не використану потужність, а також з простим технологічним обладнанням в випадку дефіциту потужності в ЕЕС [1, 2].

Прогнозування режимних параметрів і техніко-економічних показників є одним із важливих завдань, як при прогнозуванні, так і при веденні діючих режимів енергообладнання підприємства. Складаючи плани за різними показникам на наступну добу, тиждень, місяць, квартал, рік, служба головного енергетика підприємства повинна вирішувати задачу прогнозування енергобалансу - співвідношення між потребою в електроенергії (потужності) і засобами її задоволення. Одним з показників при прогнозуванні є рівень очікуваного електро-споживання в ціло-

му по підприємству. У цьому сенсі величина прогнозу електроспоживання є опорним показником для прогнозування балансів електроенергії та потужності. Необхідність точного прогнозування споживання електроенергії обумовлена технологічними і економічними причинами підприємства.

Точність прогнозних розрахунків визначається відповідністю застосовуваних математичних моделей процесу коливань споживання електроенергії. В цілому дані коливання являють собою складний нестационарний випадковий процес, який має певні циклічності (регулярні коливання) [3]. При застосуванні математичних моделей і програмних засобах фахівці служби головного енергетика підприємства зазвичай обмежуються усередненими за минулі періоди значеннями. Таку методику розрахунків очікуваних планових величин називають зазвичай «ручним прогнозом». Спрощене, «ручне» прогнозування споживання може давати досить високі значення математичного очікування помилок, широкий довірчий інтервал і практично не застосовується для швидких оперативних розрахунків в темпі процесу [4-6].

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження моделей експоненціального згладжування при прогнозуванні електроспоживання підприємства харчової промисловості для забезпечення достатньої точності середньострокового прогнозування шляхом врахування впливу виробничих, режимних та інших факторів на індивідуальні режими електроспоживання.

Аналіз досліджень і публікацій. Питання прогнозування електроспоживання займалися такі провідні українські вчені, як Праховник А.В. [1], Розен В.П. [1,2], Дегтярев В.В. [1], Бевчая Е.А. [2], Івахненко А.Г. [3] та ін. За останні роки прогнозування електроспоживання застосовувало різні методи та моделі. Аналіз попередніх років показує, що найпростішим та найкращим способом прогнозування електроспоживання запропоновано метод згладжування. У запропонованому алгоритмі значення рівня, тенденції і сезонності згладжуються за допомогою експоненціального згладжування. При цьому параметри згладжування можуть бути різними. Головне, що завжди можна підібрати такі параметри згладжування, які дають велику точність моделі на тестовому наборі і потім використовувати ці параметри при реальному прогнозуванні [9].

Викладення матеріалу і результати дослідження. Під час аналізу моделей експоненціального згладжування було використано статистичні дані електроспоживання підприємства харчової промисловості. Часовий ряд включає щомісячне електроспоживання підприємства в період з березня 2012 по листопад 2015 рр., наведений на рис. 1.

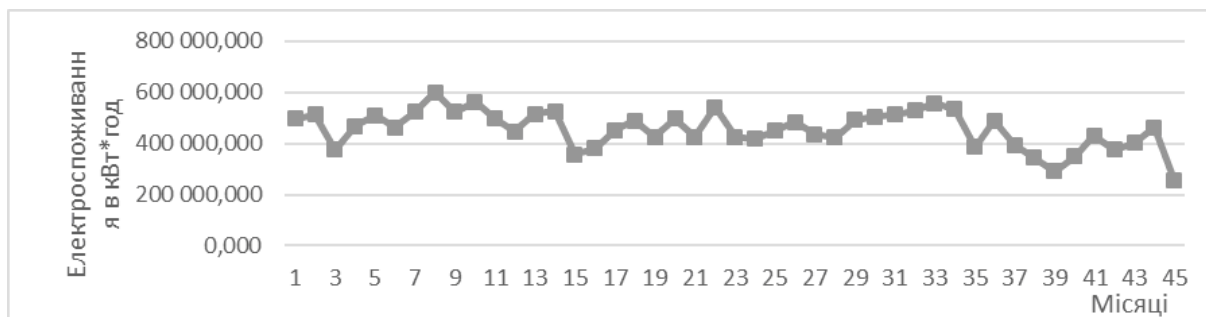


Рис. 1. Часовий ряд спостережень електроспоживання підприємства харчової промисловості

Частіше для описання часових рядів з характеристиками що варіюються найбільше часто використовують метод експоненціального згладжування [7]. Цей метод застосовується для кількісної оцінки впливу яке надає на прогнозний показник попередні члени динамічного ряду з врахуванням їх віддаленості від кінця розглянутої послідовності змінних величин.

При використанні метода експоненціального згладжування степінь дії кожного члена динамічного ряду на величину змінної у в майбутньому розподіляється в відповідності з експоненціальним законом. Це означає, що дія замикаючих впливів відбивається на прогнозних оцінках помітніше чим вплив початкових рівнів ряду [7].

Експоненціальне згладжування являється простим варіантом самонавчальної моделі. Обчислення виконуються ітеративно. Вони потребують менше арифметичних операцій, чим для моделей зі змінним середнім $S_i = \frac{1}{\tau} \sum_{i=\tau}^1 x_{t-i}$. Масив передісторії зменшується до одного значення

S_{i-1} . Експоненціальне згладжування завжди використовують попереднє значення експоненціальної середньої

$$\bar{x}_\tau = \alpha x_\tau + (1 - \alpha) \cdot S_\tau, \quad (1)$$

де $0 < \alpha < 1$ параметр згладжування.

Коли процес тільки починається, повинна бути деяка величина S_0 , наприклад, середнє значення $S_0 = \frac{1}{\tau} \sum_{i=\tau}^1 x_\tau$, яке може бути використано в якості значення, попереднього S_1 . Розглянемо ряд, генерований моделлю

$$x_t = a + \xi_t,$$

де $a = \text{const}$; ξ_t - випадкові неавтокорельовані відхилення, або шум із середнім значенням 0 і дисперсією σ^2 . Використаємо до нього процедуру експоненціального згладжування (1). Можна показати, що

$$S_t = \alpha \sum_{i=0}^{N-1} \omega^i x_{t-i} + S_0 \omega^N,$$

Являється зваженою сумою всіх членів ряду. Так як $\omega < 1$ ($\omega = 1 - \alpha$), то при $N \rightarrow \infty \omega^N \rightarrow 0$ і $\alpha \sum_{i=0}^{N-1} \omega^i \rightarrow 1$. $S_t = \alpha \sum_{i=0}^{\infty} \omega^i x_{t-i} = \alpha + \alpha \sum_{i=0}^{\infty} \omega^i \xi_{t-1}$.

Відповідно експоненціальне згладжування можна представити як фільтр, на вхід якого в вигляді потоку послідовно поступають члени вихідного ряду, а на виході формуються значення експоненціальної середньої.

При цьому ваги зменшують експоненціального в залежності від давності спостереження.

Чим менше α , тим в більшому ступені фільтрується коливання вихідного ряду.

Найдемо математичне очікування $M(S_t) = M(x_t) = a$ і дисперсія

$$D(S_t) = M[(S_t - a)^2] = M[(\alpha \sum_{i=0}^{\infty} \omega^i \xi_{t-1})^2] = \alpha^2 \sum_{i=0}^{\infty} \omega^{2i} \sigma^2 = \sigma^2 \frac{\alpha}{2 - \alpha}.$$

Так як $0 < \alpha < 1$, то $D(S_t) = D(x_t) = \sigma^2$. Як видно при великому значенні α дисперсія експоненціального середнього незначно відрізняються від дисперсії ряду x_t . Таким чином, експоненціальна середня S_t має те, що математичне очікування, що і ряд x_t но меншу дисперсію. Чим менше α тим в більшій степені зменшується дисперсія експоненціальної середньої. Експоненціальне середнє використовується для прогноз в момент t на період попередження l : $x_t(l) = S_t - S_{t-1} + \alpha(x_t - S_{t-1})$. Новий прогноз отримуємо коригуванням попереднього прогнозу з врахуванням його похибки. Оскільки будь-яка дискретно-безперервна функція може бути представлена у вигляді суми ступінчатих функцій виду: $a_t = a_t l(t)$, то передбачається, що часовий ряд генерується моделлю $x_t = a_t + \xi_t$, де a_t - в загальному випадку є випадкова величина. При короткостроковому прогнозуванні бажано відобразити зміну x_t і в той же час найкращим чином очистити ряд від випадкових коливань ξ_t . Для цього, з одного боку, необхідно збільшити вагу більш свіжих спостережень, що можна досягти збільшенням α , а з іншого боку для згладжування випадкових відхилень величину α потрібно зменшити. Як видно, ці дві вимоги знаходяться в протиріччі. Пошук компромісний значення α становить завдання оптимізації моделі. У [8] було показано для прогнозування стаціонарного процесу з автокореляційною функцією виду $\rho_i = \rho_1^i$, що мінімум середнього квадрата помилки при прогнозуванні такого ряду на 1 крок вперед ($l=i=1$) буде при

$$\alpha_{opt} = \begin{cases} \frac{3\rho_1 - 1}{2\rho_1} & 1/3 < \rho_1 \leq 1 \\ 0 & -1 \leq \rho_1 \leq 1/3 \end{cases},$$

де ρ_1 - коефіцієнт автокореляції при лагу 1.

Якщо $l > 1$, то суттєво підвищується критична величина $\rho_{1крит}$, нижче за яку оптимальне значення α_{opt} дорівнює 0. Якщо дані сильно корельовані $\rho_1 \leq 1/3$ і період попередження l малий, яось згладжувати не варто. Доцільно в якості прогнозу використовувати найбільш пізніше спостереження. Якщо $\rho_1 \leq 1/3$, то найбільший, що може дати найпростіша модель, це оцінка середнього рівня, навколо якого варіює процес [9]. Для короткострокових прогнозів зна-

чення α , як правило, потрібно брати великим, а для більш довгострокових меншим. Вибір конкретних значень параметрів α багато в чому визначається досвідом розробника.

Метод Хольта

Метод Хольта або експоненціального згладжування з лінійним трендом родоначальник методів адаптивного прогнозування [9]

$$\begin{cases} S_t = \alpha(S_{t-1} + T_{t-1}) + (1 - \alpha)x_t \\ T_t = \nu(S_t + S_{t-1}) + (1 - \nu)T_{t-1} \end{cases}, \quad (2)$$

в якому крім константи α використовуються константа ν згладжування тренда.

Метод Хольта-Вінтера

Метод Хольта-Вінтера або метод Вінтера, в якому фігурує додаткова константа η згладжування циклів з періодом p [9]

$$S_t = \alpha(S_{t-1} + T_{t-1}) + (1 - \alpha)\frac{x_t}{Z_{t-p}}$$

$$Z_t = \eta(x_t / S_{t-1}) + (1 - \eta)Z_{t-p}$$

Оптимальне значення параметра p є те, яке мінімізує суму квадратів залишків.

Результати дослідження. Загальне формулювання задачі дослідження являється те, як впливає модель експоненціального згладжування на точність прогнозу електроспоживання.

Послідовні значення споживання електроенергії за період з березня 2012 - листопад 2015 рр.

Дані отримані зі статистики x_1, x_2, \dots, x_n .

Графік часового ряду електроспоживання підприємства харчової промисловості подано на рис. 1.

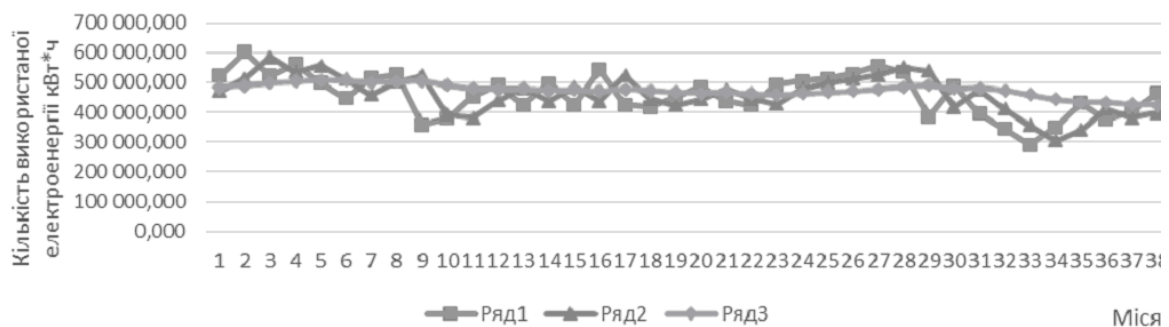


Рис. 2. Порівняльний графік вихідного ряду 1 та прогнозних значень електроспоживання підприємства: при $\alpha=0,8$ – ряд 2; $\alpha=0,1$ – ряд 3

Метод експоненціального згладжування при вибраних коефіцієнтах $\alpha=0,8$; $\alpha=0,1$. Як видно з графіка при $\alpha=0,8$ прогнозні дані більше мають форму фактичних даних, але похибка становить більше значення 2,39% і точність прогнозування 97,61% [табл. 1]. При $\alpha=0,1$ прогнозні дані менше схожі на фактичні, але похибка становить менше значення 2,21% і точність прогнозування 97,79% [табл. 1].

Метод експоненціального згладжування при вибраних коефіцієнтах за формулою Брауна $\alpha=0,04$ та вибір початкових даних двома способами: 1 спосіб S_0 – середньоарифметичне значення показників за всі місяці – $S_0=456356,1$; 2 спосіб S_0 дорівнює початковому значенню вхідних даних дослідження – $S_0=496490,5$. Як видно з графіків при $\alpha=0,04$ та початкових значеннях 1- $S_0=456356,1$; 2- $S_0=496490,5$ прогнозні дані менше схожі на фактичні, але похибка складає менше значення:

1 спосіб похибка становить 2,26% і точність прогнозування 97,74% [табл. 1];

2 спосіб похибка становить 2,22% і точність прогнозування 97,78% [табл. 1].

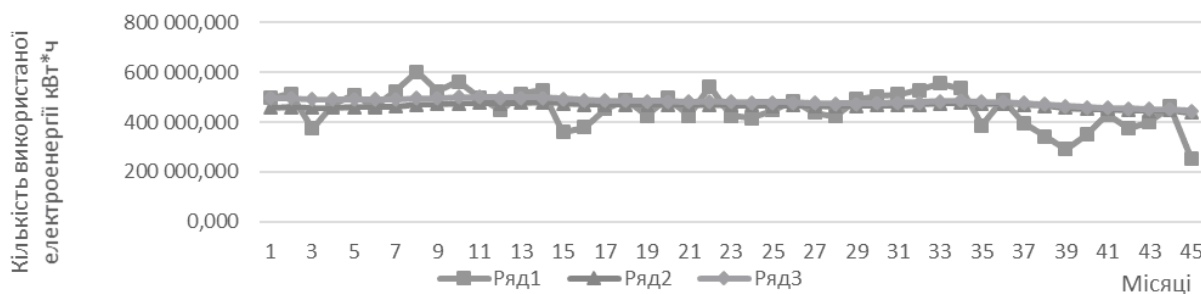


Рис. 3. Порівняльний графік вихідного ряду 1 та прогнозних значень електроспоживання підприємства: при $\alpha=0,04$, $S_0=456356,1$ – ряд 2; $\alpha=0,04$, $S_0=496490,5$ – ряд 3

Метод експоненціального згладжування з лінійним трендом (метод Хольта)

$y = a + bx$ $b=1531,4$, $a=448484$ при вибраних коефіцієнтах та виборі початкових даних Як видно з графіків прогнозні дані не схожі на фактичні, при цьому похибка становить 3,38%, а точність прогнозу 96,62% [табл. 1].

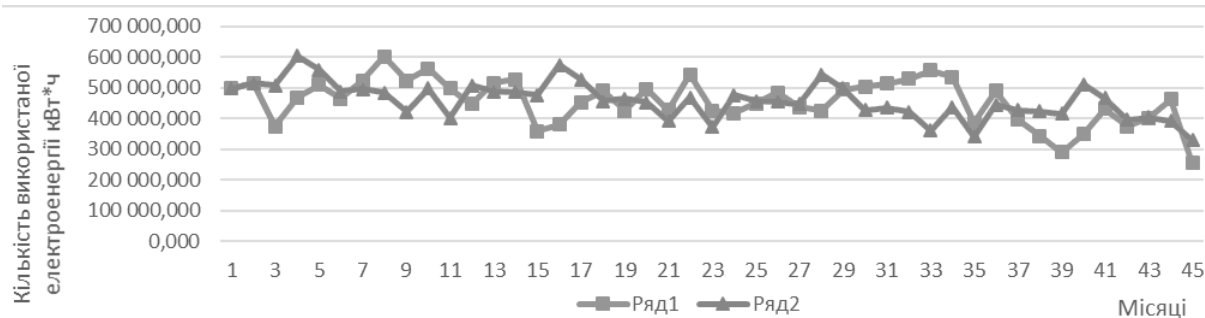


Рис. 4. Порівняльний графік вихідного ряду 1 та прогнозних значень електроспоживання підприємства: при $b=1531,4$, $a=448484$ - ряд 2

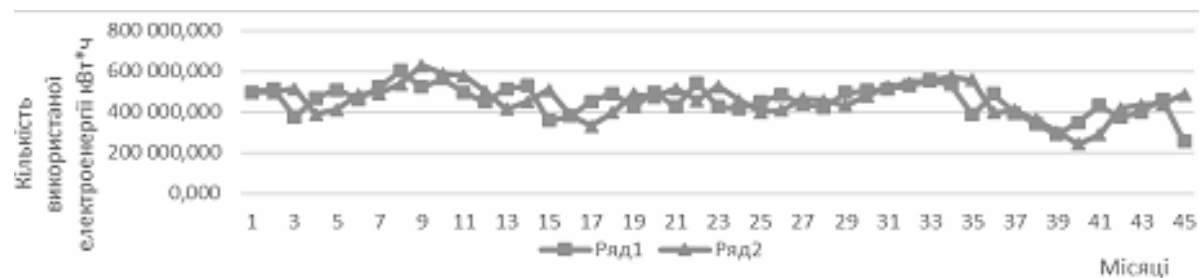


Рис. 5. Порівняльний графік вихідного ряду 1 та прогнозних значень електроспоживання підприємства при коефіцієнтах згладженого ряду $k=0,5$; згладженого тренда $b=0,9$; згладженого сезонності $q=0,5$ – ряд 2

Метод експоненціального згладжування (метод Хольта-Вінтера) при вибраних коефіцієнтах згладженого ряду $k=0,5$; згладженого тренда $b=0,9$; згладженого сезонності $q=0,5$ та виборі початкових даних

Як видно з графіків прогнозні дані схожі на фактичні, при цьому похибка становить 4,79 %, а точність прогнозу 95,21 % [табл. 1].

Результати прогнозування та графіка точності прогнозування за різними моделями експоненціального згладжування наведено в табл. 1 та рис. 6.

Результати досліджень

Методи експоненціального згладжування	Коефіцієнти згладжування	Похибка прогнозування методу	Середньоквадратична похибка	
Експоненціальне згладжування першого порядку	$\alpha=0,8$	2,39%	97,61%	
	$\alpha=0,1$	2,21%	97,79%	
	Метод Брауна $\alpha=0,04$		2,26%	97,74%
			2,22%	97,78%
Експоненціальне згладжування з лінійним трендом (метод Хольта) рівняння тренда $y=bx+a$	$b=1531.4$	3,38%	96,62%	
	$a=448484$			
Експоненціальне згладжування (метод Хольта-Вінтера)	Коефіцієнт згладженого ряду $k=0,5$	4,79%	95,21%	
	Коефіцієнт згладженого тренда $b=0,9$			
	Коефіцієнт згладженого сезонності $q=0,5$			

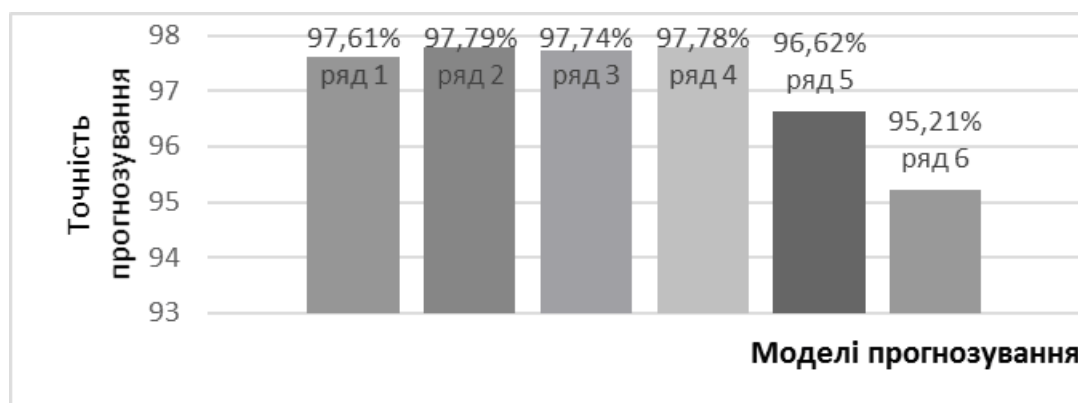


Рис. 6. Порівняльний графік точності прогнозування електроспоживання підприємства за моделями експоненціального згладжування (див. табл. 1)

Висновки і напрямки подальших досліджень. З аналізу моделей слідує, те, що кожна із моделей прогнозування являє собою логічне завершення, але всі вони мають як переваги так і недоліки:

дані методи мають відносно невелику похибку прогнозовної моделі та являються методами швидкого прогнозування;

результати прогнозу сильно залежить від параметрів згладжування та інтервал, в межах якого змінюється параметр згладжування, дуже великий і змінюється при прогнозуванні різних часових рядів, при цьому виробити чіткі рекомендації по вибору параметра не вдається;

в отриманих результатів також можна отримати результат, що просте експоненціальне згладжування являється найбільш точнішим при прогнозування на середньострокові та довгострокові прогнози при цьому точність складає 97,79 % і похибка моделі 2,21 %.

також можна відзначити недолік метода Хольта-Вінтера тим що він являється менш точним та більш складним в прогнозуванні при цьому точність складає 95,21 % і похибка 4,79 %

Список літератури

1. Праховник А.В. Энергосбережение режимов электроснабжения горнодобывающих предприятий / А.В. Праховник, В.П. Розен, В.В. Дегтярев, – М.: Недра, 1985. – 232 с.
2. Бечвая Е.А. Прогнозирование спроса: методы и модели / Е.А. Бечвая, В.П. Розен, – Под общ. ред. Старостиной А.А. – К.: ООП Коммунаэкономика, 1996. – 196 с.
3. Ивахненко А.Г. Принятие решений на основе самоорганизации / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Зайченко, В.Д. Димитров, – М.: «Сов. радио», 1976. – 280 с.

4. **Макоклюев Б.И.** Расчет и планирование режимных параметров, балансов мощности и электроэнергии АО-энерго и предприятий сетей с помощью программных комплексов «Энергостат» и «РБЭ». / **Б.И. Макоклюев**, - М.: Сборник докладов «Современные методы и средства расчета, нормирования и снижения технических и коммерческих потерь электроэнергии в электрических сетях» НЦ ЭНАС, 2000.
5. **Макоклюев Б.И.** Прогнозирование потребления электроэнергии в АО «Мосэнерго». / **Б.И. Макоклюев, А.И. Владимиров, Г.И. Фефелова**, – ТЭК N 4, 2001. - с. 56–57.
6. **Ивашенко В.А.** Модели автоматизированного прогнозирования электрических нарузов промышленных предприятий / **В.А. Ивашенко, М.В. Колоколов, Д.А. Васильев** // Управление большими системами. Выпуск 34 с.254 – 266.
7. **Денискин В.В.** Основы экономическо прогнозирования в пищевой промышленности / **В.В. Денискин**, – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 192с.
8. **Светульников И.С.** Методы и модели социально-экономического прогнозирования / **И.С. Светульников, С.Г. Светульников**, - М.: Издательство Юрайт, 2014. – 351 с.
9. **Лукашин Ю.П.** Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов / **Ю.П. Лукашин**, – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416с.

Рукопис подано до редакції 25.03.16

УДК621.337.41

О.Н. СИНЧУК, д-р техн. наук, проф., А.В. ПИРОЖЕНКО, канд. техн. наук, доц.

Криворожский национальный университет

В.О. ЧЕРНАЯ, канд. техн. наук, доц., В.О. ЧЕРНЫЙ, студент

Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ЗАЩИТЫ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В статье рассмотрены способы защиты транзисторных модулей широтно-импульсных преобразователей в структурах тяговых электротехнических комплексов. Предложена схема защиты силовых модулей от превышения тока. Приведены результаты моделирования аварийных ситуаций в тяговых полупроводниковых преобразователях и схем их защиты.

Ключевые слова: преобразователь, ток, напряжение, электрическая защита, пробой, электровоз, тяговый двигатель

Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями. Вопросы защиты импульсных преобразователей (ИП) как структурных элементов тяговых электротехнических комплексов являются весьма важными и актуальными, так как связаны с надежностью функционирования тягового электропривода и комплекса в целом [1,2]. Особенно это актуально для электромеханических систем рудничных видов электровозов, где главенствующую роль играют весогабаритные показатели. Большинство современных преобразователей на основе полупроводниковых приборов имеют в своем составе встроенные элементы защиты силовых модулей, которые позволяют избежать развития аварийных ситуаций при работе ИП, однако далеко не все они учитывают специфику условий эксплуатации рельсового транспорта в подземных условиях [3–6].

Анализ исследований и публикаций. Среди многообразия способов защиты тягового электрического оборудования с импульсными преобразователями (ИП) напряжения от проявления различных внутренних факторов следует выделить максимальную токовую защиту (МТЗ). Данный вид быстрodeйствующей защиты призван срабатывать при превышении значений мгновенного тока в нагрузке или в силовых *IGBT* модулях преобразователя [7]. Современные виды МТЗ имеют два уровня реализации: на уровне микропроцессорной системы управления и на уровне управляющих драйверов *IGBT*. В первом случае выходной ток преобразователя относится к числу обязательно измеряемых координат электропривода (как для реализации контура регулирования тока в системе управления электроприводом, так и для реализации токовых защит). Микропроцессорная система управления в определенные дискретные моменты времени выполняет аналогово-цифровое преобразование величины выходного тока преобразователя и при превышении заданного значения блокируется управление всеми ключами преобразователя. Во втором случае в связи с ограниченными функциональными возможностями