

6. Thompson G.L. A Branch and Bound Model for Choosing Optimal Substation Locations // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1981. Vol. PAS-100, no. 5. P. 2683-2687. DOI: 10.1109/TPAS.1981.316784
7. Gonen T. Review of distribution system planning models: A model for optimal multistage planning // IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution. 1986. Vol. 133, no. 7. P. 397-408. DOI: 10.1049/ip-c:19860060
8. Gonen T. Distribution system planning using mixed integer programming // IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution. 1981. Vol. 128, no. 2. P. 70-79. DOI: 10.1049/ip-c:19810010
9. Ramirez-Rosado I. J. Pseudodynamic planning for expansion of power distribution systems // IEEE Transactions on Power Systems. 1991. Vol. 6, no. 1. P. 245-254. DOI: 10.1109/59.131069
10. Diaz-Dorado E., Cidras E. J., Miguez E. Application of evolutionary algorithms for the planning of urban distribution networks of medium voltage // IEEE Transactions on Power Systems. 2002. Vol. 17, no. 3. P. 879-883. DOI: 10.1109/TPWRS.2002.800975
11. Diaz-Dorado E., Cidras E. J., Miguez E. Planning of large rural low voltage networks using evolution strategies // IEEE Transactions on Power Systems. 2003. Vol. 18, no. 4. P. 1594-1600. DOI: 10.1109/TPWRS.2003.818741

УДК 621.311

Н.Н. Федосенко, канд. техн. наук, доц., **П.В. Кудиев**, магистрант, **В.В. Винничук**, магистрант
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА И МЕСТ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОДСТАНЦИЙ
ГОРОДСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Предложено алгоритм решения задачи определения числа и мест размещения подстанций при решении задач развития городских распределительных электрических сетей. Представлено математическую постановку задачи в виде оптимизационной задачи дискретного программирования. Описан алгоритм, основанный на методе k-средних.

Ключевые слова: городские распределительные электрические сети; дискретные методы принятия оптимальных решений; метод k-средних.

Надійшла 19.04.2016

Received 19.04.2016

УДК 621.311

В.П. Розен, д-р техн. наук, проф., **І.Г. Ходаківський**, студент
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГНОЗНИХ МОДЕЛЕЙ ХОЛЬТА- ВІНТЕРСА

У даній роботі розглянуто метод управління електричним навантаженням промислового підприємства з використанням прогнозних моделей Хольта-Вінтерса. Представлений аналіз наукових досліджень в галузі управління електричним навантаженням. Використана модель Хольта-Вінтерса для виконання короткострокового прогнозування режиму електроспоживання. Представлені графічні результати прогнозування. Зроблено розрахунок похибок прогнозування часових рядів режиму електроспоживання. Представлений метод дозволяє провести оцінку прогнозної величини режиму електроспоживання з використанням підходу мінімізації помилок прогнозування величини електроспоживання. Результати можуть бути використані енергетиками промислових підприємств при плануванні режиму електроспоживання.

Ключові слова: метод Хольта-Вінтерса, модель Хольта, експоненціально згладжений ряд, оцінка тренда, оцінка сезонності, середнє значення квадратів похибок.

Вступ. На даний момент однією зі складових проблеми ефективного використання електроенергії є нерівномірність графіків навантаження в енергосистемі. У міру збільшення або зменшення електричного навантаження необхідно регулювати потужність, що подається. Витрати на керування електричним навантаженням з метою зменшення нерівномірності графіків навантаження набагато менші, ніж на створення маневрених потужностей і акумулюючих станцій. Економічні вигоди від створення систем регулювання можливі у вигляді зменшення капіталовкладень, зниження експлуатаційних витрат, економії палива, підвищення ККД і зниження втрат в системі. Тому стає доречним питання можливості регулювання навантаження.

Для точності регулювання споживання електричної енергії необхідно знати майбутнє підприємства, для цього застосовують розроблені методи прогнозування. В даній статті розглядається метод короткострокового прогнозування методом Хольта-Вінтерса.

Постановка проблеми. Зменшення фінансових витрат промислового підприємства на електричну енергію за рахунок підвищення достовірності прогнозованого значення електричної енергії та потужності методом Хольта-Вінтерса з допомогою використання програмного забезпечення STATISTICA.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В статті [1] показано порівняння як раніше запропонованих, так і тих, що розробляються методів короткострокового прогнозування електричного навантаження: регресійного аналізу, нейронних мереж, нечітких нейронних мереж. Порівняння підходів ґрунтується на вирішенні завдання добового прогнозування величини електричного навантаження. Інтенсивний розвиток обчислювальної техніки [2], теорії та практики моделювання, прогнозування процесів по-новому ставить питання створення інтелектуальних адаптивних програмних систем на базі оперативних комплексів у складі підприємств, організацій тощо.

На підставі відомостей про стан об'єкта, навколишнього середовища і власний стан системи за наявності пам'яті і мотивації синтезується мета моделювання (оперативний або короткостроковий контроль, прогнозування), яка поряд з іншими даними сприймається динамічною системою розпізнавання і контролю [3]. Остання, з використанням бази даних, проводить оцінку, на підставі якої приймається рішення про дію і прогнозується результат дії. На основі прогнозованої інформації дія коригується і синтезується алгоритм прийняття рішення, який реалізується після експертної оцінки за допомогою комп'ютерної системи і впливає на об'єкт. Результат дії порівнюється з прогнозом і на основі цього коригується прогнозна модель.

Класичним підходом до прогнозування є використання регресійних моделей і методів, що розкладають навантаження на регулярну (базову) і нерегулярну (залежить від погоди) складові. В роботі розглянуті системи прогнозування, побудовані на базі таких моделей як АРСС (p, q), АРПСС (p, d, q) з використанням методів сезонних кривих, сезонної декомпозиції (Census 1, Сенсус 2) тощо [4]. Такі моделі привабливі тим, що мають добре опрацьовану математичну базу і прозору структуру. Однак вони є, в основному, лінійними моделями, а ряди навантаження, які вони моделюють - нелінійні функції екзогенних змінних.

Мета дослідження. Метою дослідження є підвищення якості керування електричним навантаженням застосовуючи прогресивні моделі прогнозування споживання електричної потужності на основі поточних параметрів, для короткострокового прогнозу на місяць, що дає можливість зменшити споживання електричної енергії.

Виклад основного матеріалу досліджень. Прогнозування електричного навантаження забезпечує основну вихідну інформацію для прийняття рішень при управлінні електроенергетичними системами в процесі планування їх нормальних електричних режимів. На основі прогнозування навантаження розраховуються вихідні та оптимальні режими електроенергетичних систем, оцінюється їх надійність, економічність, якість електроенергії тощо. Більшість алгоритмів прогнозування електричного навантаження, розроблених в електроенергетиці, являють собою комбінацію різних статистичних процедур. Існують методи прогнозування, в яких проводиться виділення так званої базової складової в змінах навантаження.

Для того щоб управляти будь якою системою або об'єктом, необхідно передбачити. При управлінні електроенергетичними системами одним з інструментів передбачення для прийняття рішень є прогнозування електричного навантаження.

До теперішнього часу розроблено велику кількість методів і моделей прогнозування електричного навантаження енергосистем. Одні методи призводять до значних похибок в оцінці прогнозованих величин, інші через складність математичного апарату не отримали широкого застосування для вирішення практичних завдань електроенергетики. Тому проблема розробки методики прогнозування навантаження дуже актуальна. Одним з методів прогнозування електричного навантаження є метод Хольта-Вінтерса.

Даний метод відноситься до методів експоненціального згладжування. Багато продуктів мають тенденцію зростання або падіння продажів, це відноситься і до споживання електричної енергії. Для таких продуктів доцільно враховувати конкретний характер тенденції і сезонних коливань. На основі моделі Хольта Вінтерс (Вінтерс, Winters) створив свою прогностичну модель, яка враховує експонентний тренд і аддитивну сезонність. Даний метод є розширенням попередньої моделі Хольта. Для урахування сезонних варіацій тут застосовується додаткове рівняння, і повністю цей метод описується чотирма рівняннями:

1. Експоненціально згладжений ряд:

$$L_t = \alpha \frac{Y_t}{S_{t-s}} + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) , \quad (1)$$

2. Оцінка тренда:

$$T_t = \delta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \delta)T_{t-1} , \quad (2)$$

3. Оцінка сезонності:

$$S_t = \gamma \frac{Y_t}{L_t} + (1 - \gamma)S_{t-s} , \quad (3)$$

4. Прогноз на p періодів вперед:

$$\hat{y}_{t+p} = (L_t + pT_t)S_{t-s} , \quad (4)$$

де α, δ, γ – постійні згладжування для рівня, тренда та сезонності, відповідно; s – тривалість періода сезонного коливання.

Сезонність враховується членом $\frac{Y_t}{S_{t-s}}$ в вихідних даних, після врахування сезонності та тренда оцінки згладжуються та вираховується прогноз.

Так само, як і в методі Хольта, ваги α, δ, γ можуть вибиратися суб'єктивно або шляхом мінімізації помилки прогнозування. Перед застосуванням першого рівняння необхідно визначити початкові значення для згладженого ряду L_t , тренда T_t , коефіцієнтів сезонності S_t . Зазвичай початкове значення згладженого ряду приймається рівним першому спостереженню, тоді тренд дорівнює нулю, а коефіцієнти сезонності встановлюються рівними одиниці. Оптимальні параметри α, δ, γ підбираються шляхом мінімізації середньоквадратичної похибки прогноза.

Вихідні дані споживання електричної енергії промисловим підприємством для виконання прогнозування представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані споживання електричної енергії

№ n/n	Дата ДД-ММ-РРРР	Електроспоживання кВт*год
1	01.12.2015	14735,7
2	02.12.2015	16215,9
3	03.12.2015	7020
4	04.12.2015	5070,2
5	05.12.2015	14187,6
6	06.12.2015	17342,4
7	07.12.2015	17965,8
8	08.12.2015	18520
9	09.12.2015	18043,6
10	10.12.2015	13012,6
11	11.12.2015	10724,5
12	12.12.2015	12946,8
13	13.12.2015	12663,6
14	14.12.2015	7974,6
15	15.12.2015	8365,4
16	16.12.2015	13864,5
17	17.12.2015	12506,6
18	18.12.2015	10803,3
19	19.12.2015	15011,7
20	20.12.2015	18686,5
21	21.12.2015	19077,5
22	22.12.2015	19302,9

Продовження таблиці 1

23	23.12.2015	18934,4
24	24.12.2015	17562,8
25	25.12.2015	18763,2
26	26.12.2015	17047,8
27	27.12.2015	15123,2
28	28.12.2015	19570
29	29.12.2015	17411,5
30	30.12.2015	18087,3
31	31.12.2015	15623,7

Використовуючи програмний додаток STATISTICA виконаємо короткострокове (на 1 місяць вперед) прогнозування електроспоживання вихідних даних методом Хольта-Вінтерса. Для отримання результатів дослідимо вихідні дані електричного споживання змінюючи коефіцієнти згладжування α , δ та γ в трьох випадках, а саме при 0,1; 0,5; 0,9 відповідно. Значення параметрів α, δ, γ вибрані для прогнозу з мінімальною середньоквадратичною похибкою.

На рисунках 1, 3, 5 представлені графічні результати прогнозування електричного споживання.
 На рисунках 2, 4, 6 представлені дані похибок прогнозування при відповідних значеннях коефіцієнтів.

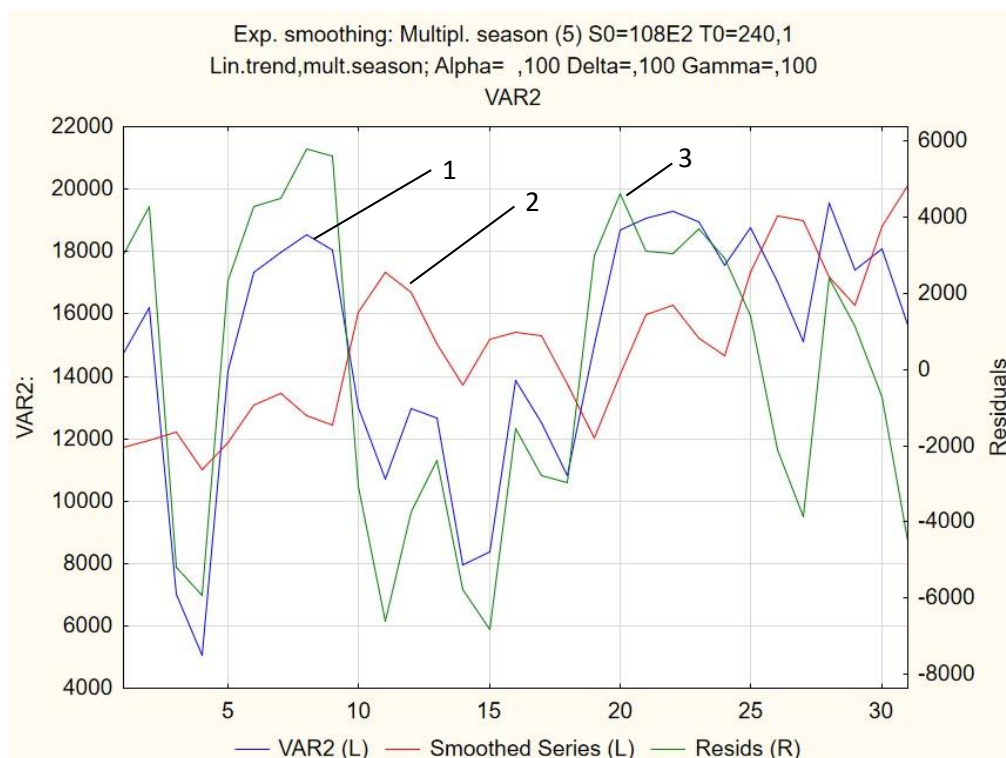


Рисунок 1 – Графічні результати прогнозування режиму електроспоживання, де 1 – реальні дані підприємства споживання електричної енергії, 2 – результат прогнозування на місяць при коефіцієнтах α, δ, γ рівних 0,1, 3 – похибка прогнозування.

		Exp. smoothing: Multipl. season (5) S0=108E2 T0=240,1 (Spreadsheet1) Lin.trend,mult.season; Alpha=,100 Delta=,100 Gamma=,100 VAR2	
Summary of error		Error	
Mean error		-95,736611	
Mean absolute error		3644,443105	
Sums of squares		489416440,807591	
Mean square		15787627,122826	
Mean percentage error		-9,522968	
Mean abs. perc. error		29,768582	

Рисунок 2 – Похибки прогнозування при коефіцієнтах рівних 0,1.

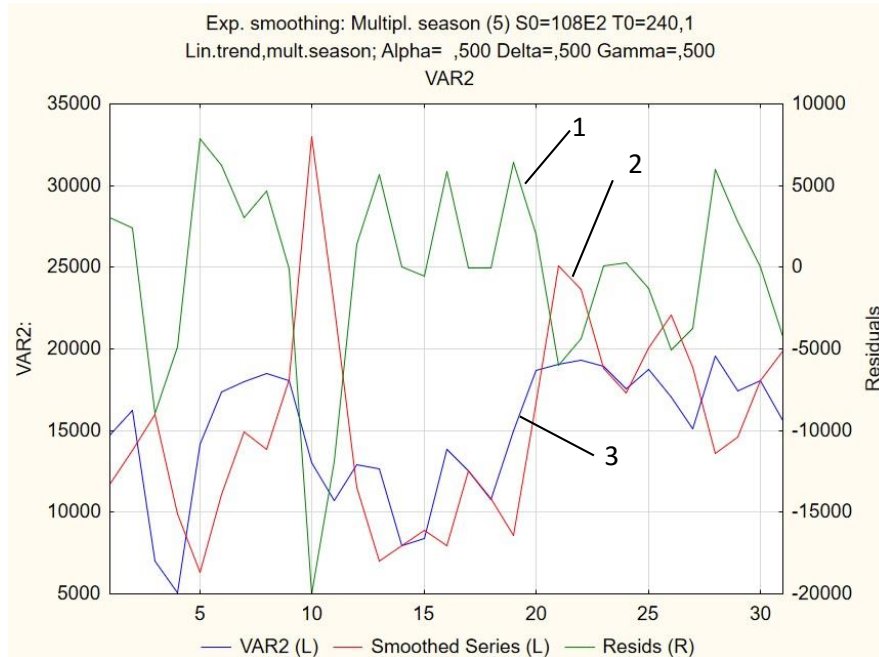


Рисунок 3 – Графічні результати прогнозування режиму електроспоживання, де 1 – результат прогнозування на місяць при коефіцієнтах α, δ, γ рівних 0,5, 2 – похибка прогнозування, 3 – реальні дані підприємства споживання електричної енергії.

Exp. smoothing: Multipl. season (5) S0=108E2 T0=240,1 (Spreadsheet1)	
Lin.trend,mult.season; Alpha= ,500 Delta=,500 Gamma=,500	
VAR2	
Summary of error	Error
Mean error	-4,292120E+02
Mean absolute error	4,161017E+03
Sums of squares	1,065281E+09
Mean square	3,436392E+07
Mean percentage error	-8,655669E+00
Mean abs. perc. error	3,251695E+01

Рисунок 4 – Похибки прогнозування при коефіцієнтах рівних 0,5.

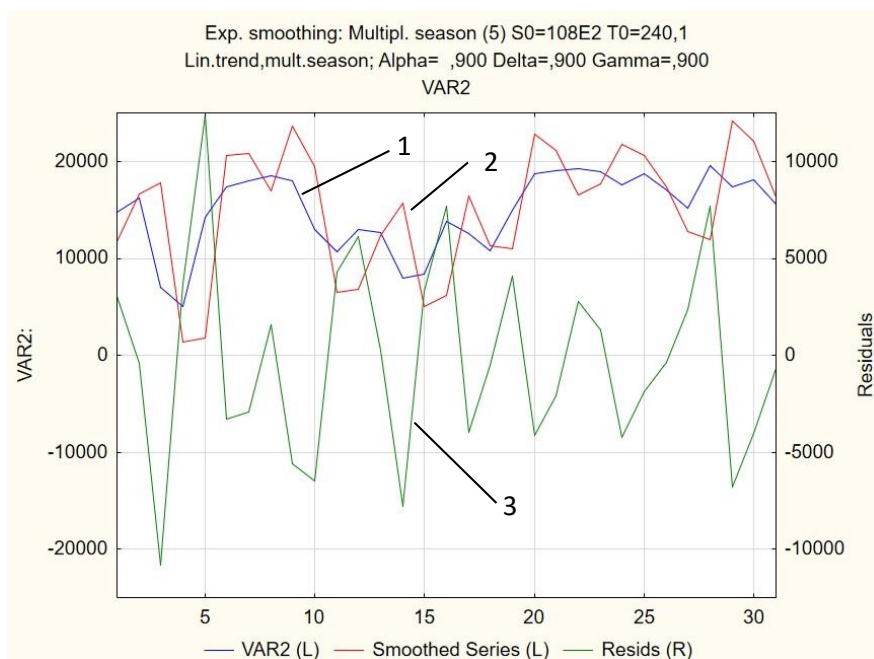


Рисунок 5 – Графічні результати прогнозування режиму електроспоживання, де 1 – реальні дані підприємства споживання електричної енергії, 2 – результат прогнозування на місяць при коефіцієнтах α, δ, γ рівних 0,9, 3 – похибка прогнозування.

	Exp. smoothing: Multipl. season (5) S0=108E2 T0=240,1 (Spreadsheet1) Lin.trend,mult. season; Alpha= ,900 Delta=,900 Gamma=,900 VAR2
Summary of error	Error
Mean error	-175,746564
Mean absolute error	4074,282088
Sums of squares	785731105,947154
Mean square	25346164,707973
Mean percentage error	-2,115765
Mean abs. perc. error	32,787540

Рисунок 6 – Похибки прогнозування при коефіцієнтах рівних 0,9.

Для визначення точності прогнозування використовують оцінки точності. Оцінка точності важлива при визначенні спроможності отриманого прогнозу.

Відома велика кількість оцінок, що визначають точність прогнозування, але для обчислення будь-якої з них необхідно знати на кожному кроці помилку прогнозування.

Похибка прогнозування на один крок вперед в момент часу t дорівнює:

$$e_t = X_t - \hat{X}_t, \quad (5)$$

де X_t – значення вхідної послідовності в момент часу t ; \hat{X}_t – прогноз на момент часу t зроблений на попередньому кроці.

Найбільш поширеною оцінкою точності прогнозування є середнє значення квадратів похибок (Mean Squared Error):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^{n-1} e_t^2, \quad (6)$$

де n – кількість елементів послідовності.

Іноді, як недолік оцінки MSE вказують на її надмірну чутливість до рідкісних одиночних похибок великих величин. Це пояснюється тим, що значення похибки при обчисленні MSE зводиться в квадрат. У цьому випадку в якості альтернативи пропонується використовувати середнє значення абсолютної похибки (Mean Absolute Error):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^{n-1} |e_t|. \quad (7)$$

Передбачається, що при використанні MAE можна отримати більш стійкі оцінки.

Дані оцінки добре підходять, для визначення точності прогнозу однієї і тієї ж послідовності при різних параметрах моделі або при використанні різних моделей, але вони виявляються малоприматними для порівняння між собою результатів прогнозування, отриманих на різних послідовностях

Виконавши процес прогнозування були розраховані похибки, а саме середня абсолютна похибка $e_{t\text{cp}}$, сума квадратів похибок $\sum e_t^2$, середнє значення квадратів похибок MSE та середнє значення абсолютної похибки MAE.

Використовуючи дані похибок, розрахованих за допомогою програмного додатку STATISTICA, побудуємо графік залежності значень похибок від коефіцієнтів α, δ, γ при значеннях коефіцієнтів 0,1, 0,5, 0,9 відповідно.

Результати для побудови графіків представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Таблиця для побудови графіків залежності похибки від коефіцієнтів α, δ, γ

№ n/n	Коефіцієнти α, δ, γ		
	0,1	0,5	0,9
Середня абсолютна похибка $e_{t\text{cp}}$	$36,444 \cdot 10^2$	$41,61 \cdot 10^2$	$40,742 \cdot 10^2$
Сума квадратів похибок $\sum e_t^2$	$48,941 \cdot 10^7$	$106,528 \cdot 10^7$	$78,573 \cdot 10^7$
Середнє значення квадратів похибок MSE	$15,787 \cdot 10^6$	$34,363 \cdot 10^6$	$25,346 \cdot 10^6$
Середнє значення абсолютної похибки MAE	29,768	32,516	32,787

Порівняння похибок прогнозування

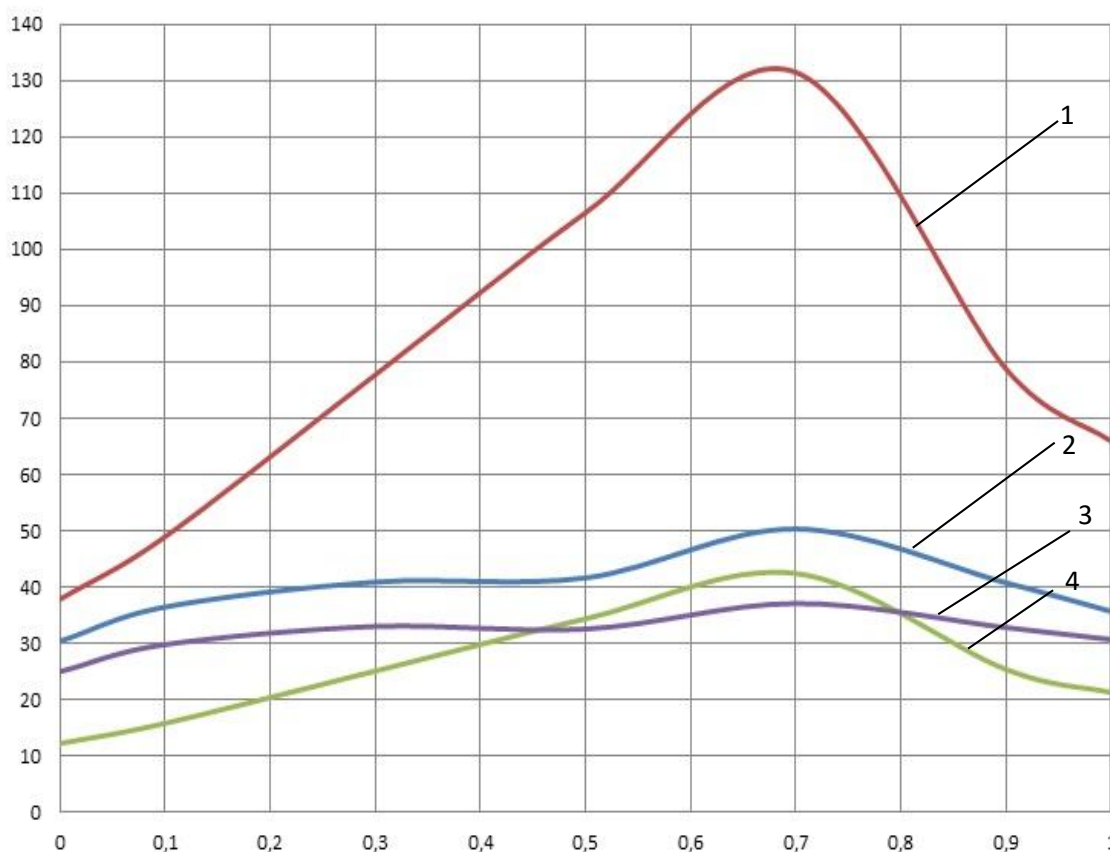


Рисунок 7 – Графічні результати порівняння похибок прогнозування з використання метода Хольта-Вінтерса, де 1 – сума квадратів похибок $\sum e_t^2$; 2 – середня абсолютна похибка $e_{t\text{cp}}$; 3 – середнє значення абсолютної похибки MAE; 4 – середнє значення квадратів похибок MSE.

Отримані результати порівнюємо з реальними даними електроспоживання і розрахуємо різницю між при відповідних коефіцієнтах α, δ, γ .

При коефіцієнтах прогнозування α, δ, γ рівних 0,1 різниця складає 3354,34 кВт*год, при α, δ, γ рівних 0,5 – 13305,57 кВт*год, при α, δ, γ рівних 0,9 – 5448,14 кВт*год.

Висновки. Виконавши короткострокове прогнозування вихідних даних електроспоживання підприємства, методом Хольта-Вінтерса, можна зробити висновок що точність прогнозування більша при коефіцієнтах α, δ, γ рівних 0,1.

Маючи результати прогнозування підприємство матиме більш повну картину для можливості заощадження коштів підприємства на оплату електричної енергії.

Список використаної літератури

1. Манусов, В. З. Краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки на основе нечеткой нейронной сети и ее сравнение с другими методами [Текст] / УДК 621.311:519.8 / Новосибирский государственный технический университет / В. З. Манусов, Е. В. Бирюков // Томск, 2006 – 153 с.

2. Чепурна, М. М. Удосконалення систем керування споживачами-регуляторами з метою регулювання графіків навантаження енергосистем [Текст]: автореф. к. т. н. НТУ «ХП» / УДК 621.311 / IX Міжнародна науково-практична студентська конференція магістрантів / М. М. Чепурна, Г. І. Мельников // Харків – 2015 – 159 с.

3. Галустов, Г. Г. Математическое моделирование и прогнозирование в технических системах: Учебное пос. [Текст] / ТТИ ЮФУ / Г.Г. Галустов, С.П. Бровченко, С.Н. Мелешкин // Таганрог, 2008 – 30 с.

4. Праховник А. В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий [Текст]: книга / УДК 622.234 / А. В. Праховник, В. П. Розен, В. В. Дегтерев // М.: Недра, 1985 – 232 с.

5. Шумилова, Г. П. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур [Текст] / УДК 621.311.016.3:004.032.26 / Российская академия наук уральское отделение / Коми научный центр / Институт социально-экономических и энергетических проблем севера / Г.П.Шумилова, Н.Э.Готман, Т.Б.Старцева // Сыктывкар, 2008 – 4 с.

V. Rozen, I. Khodakivskiy

**National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»
ELECTRIC LOAD MANAGEMENT THROUGH THE USE OF PREDICTIVE MODELS
HOLT-WINTERS**

In this paper, the method of managing the electric load industrial enterprises using predictive models Holt-Winters. The analysis of research in the field of electrical load. Used Holt-Winters model to perform short-term forecasting mode power consumption. Presented graphic forecasting results. Made errors of calculation time series prediction mode power consumption. The method allows to assess the predictive value mode power consumption using the approach of minimizing prediction error value of power consumption. The results can be used in power engineering industry in planning mode power consumption.

Keywords: Holt-Winters method, model Holt, exponentially smoothed series, trend assessment, evaluation seasonality, mean squares errors.

References

1. Manus, V. Z. Short-term forecasting of electric load based on fuzzy neural network and its comparison with other methods [Text] / UDC 621.311:519.8 / Novosibirsk State Technical University / V. Z. Manusov, E. V. Biryukov // Tomsk, 2006 – 153 p.
2. Chepurna, M. M. Improving consumer-management controls to regulate load schedule grids [Text]: author. k. t. n. NTU "KPI" / UDC 621.311 / IX International scientific conference of graduate student / M. M. Chepurna, G. I. Melnikov // Kharkiv, 2015 – 159 p.
3. Galustov, G. G. Mathematical modeling and forecasting of technical systems: Textbook [Text] / TTY SFU / G. G. Galustov, S. P. Brovchenko, S. N. Meleshkin // Taganrog, 2008 – 30 p.
4. Prakhovnik, A. V. Energy-saving modes of power mining enterprises [Text]: a book / UDC 622.234 / A. V. Prakhovnik, Rozen V. P., V. V. Degterev // М.: Nedra, 1985 - 232 p.
5. Shumilova, G. P. Prediction of electrical load in operational control of power systems based on neural network structures [Text] / UDC 621.311.016.3:004.032.26 / Russian Academy of Sciences Ural Branch / Komi Research Center / Institute for Socio-Economic and Energy Problems of the North / G. P. Shumilova, N. E. Gotman, T. B. Startseva // Syktyvkar, 2008 – 4 p.

УДК 621.311

В.П. Розен, д-р техн. наук, проф., И.Г. Ходаковский, студент

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГНОЗНОЙ
МОДЕЛИ ХОЛЬТА-ВИНТЕРС**

В данной работе рассмотрен метод управления электрической нагрузкой промышленного предприятия с использованием прогнозных моделей Хольта-Винтерса. Представлен анализ научных исследований в области управления электрической нагрузкой. Использована модель Хольта-Винтерса для выполнения краткосрочного прогнозирования режима электропотребления. Представлены графические результаты прогнозирования. Произведен расчет погрешностей прогнозирования временных рядов режима электропотребления. Представленный метод позволяет произвести оценку прогнозной величины режима электропотребления с использованием подхода минимизации ошибок прогнозирования величины электропотребления. Результаты могут быть использованы энергетиками промышленных предприятий при планировании режима электропотребления.

Ключевые слова: метод Хольта-Винтерса, модель Хольта, экспоненциально сглаженный ряд, оценка тренда, оценка сезонности, среднее значение квадратов погрешностей.

Надійшла 24.03.2016

Received 24.03.2016