

К.Г. Петрова, асп., С.В. Серебренніков, доц., канд. техн. наук, О.І. Сіріков, доц., канд. техн. наук

*Кіровоградський національний технічний університет*

## Нейро-нечітке сегментування роздрібного ринку електроенергії

Наведено методику сегментування роздрібного ринку електричної енергії з використанням нейро-нечіткого моделювання. Сформовано фактори, які лягли в основу сегментування за критерієм важливості споживача для енергопостачальної компанії. Визначено нечіткі межі належності характеристикних показників до якісних термів.

**ринок електроенергії, сегмент ринку, фактори сегментування, нечітка логіка, нейронна мережа, ціна**

**Вступ.** Однією з нагальних проблем електроенергетики України є нерівномірність електроспоживання в часі, що обумовлюється характером попиту споживачів на електроенергію (ЕЕ) протягом доби, тижня, сезону, року. Найбільш раціональним способом вирішення зазначеної проблеми є залучення споживачів до вирівнювання графіків електричних навантажень (ГЕН) енергосистеми. Перехід до ринкових відносин вимагає впровадження маркетингових підходів до цілеспрямованої організації роботи зі споживачами на основі сегментування електроенергетичного ринку [1].

**Аналіз досліджень та публікацій.** Відповідно до нормативних документів та постанов НКРЕ України розподіл споживачів ЕЕ проведено суто формально, у відповідності до статистичного поділу – за галузевим принципом, без врахування особливостей ринку. За географічною ознакою ринок ЕЕ розділений відповідно до існуючого адміністративного поділу території України на регіональні (обласні) ринки.

Таке “сегментування” не враховує характер і степінь впливу режиму використання ЕЕ споживачами на нерівномірність ГЕН об’єднаної енергосистеми (ОЕС). Для кожного сегмента ринку встановлюються певні величини тарифів, які, на сьогодні, не слугують ефективним інструментом регулювання режиму електроспоживання і потребують пошуку нових релевантних критеріїв упорядкування споживачів.

Необхідно відзначити, що існує зонування попиту на ЕЕ, яке покладено в основу диференціювання роздрібних цін протягом доби, характеризується такими недоліками:

---

© К.Г. Петрова, С.В. Серебренніков, О.І. Сіріков, 2012

- неадекватність дискретизації попиту на енергію в ОЕС по відношенню до попиту окремих споживачів;

- відсутність гнучкості зонування попиту, яка обмежується виділенням лише шести часових зон (один період нічного провалу енергоспоживання; два – пікового та три – напівпікового енергоспоживання) та лише трьох цінових зон (нічної, пікової та напівпікової);

- нестабільність тривалості часових зон та їх розподілу в часі, що ускладнює процеси планування виробничої діяльності для промислових споживачів (ПС);

- неадекватність диференціації роздрібних цін до графіків попиту окремих ПС.

В роботі [2] автори розділяють споживачів на 5 груп за класами напруги живлення ( $U = 110/ 35/ 27,5/ 10/ 0,4$  кВ) та на 9 груп за галузевою ознакою (промисловість, будівництво, сільське господарство, комунально-побутове обслуговування, міське населення, сільське населення, непромислові споживачі, електричний залізничний транспорт, електричний міський транспорт). Роздрібні ціни на ЕЕ розраховуються на основі фактичних витрат енергопостачальної компанії (ЕК) на купівлю, передачу, та збут енергії споживачам вказаних груп, які розрізняються переважно величиною втрат енергії в мережах до шин споживача. Водночас, “неповна, невизначена вихідна інформація” [2] унеможливує точний розрахунок ціни.

В [3] зазначається, що окремі сегменти додатково можуть поділятися за певними факторами. Так, для сегменту ПС у якості додаткових факторів пропонується врахування: величини приєднаної потужності; особливостей технологічного процесу (неперервний, періодичний, циклічний); вимоги до надійності, якості електропостачання; вплив на нерівномірність ГЕН ОЕС; обсяги і темпи зростання електроспоживання; степінь готовності взяти участь у програмах з управління попитом на ЕЕ та реагування на певні стимули маркетингу.

Авторами [4] пропонується спочатку розділити роздрібних споживачів ЕЕ на «значущих» та «незначущих» з точки зору їх впливу на сумарне електричне навантаження ЕК. Після чого «значущі» додатково групуються за характером та мірою впливу на нерівномірність електричного навантаження ЕК, залежно від якої пропонується встановлювати цінні ставки на потужність.

Проте, при однаковому впливі неоднорідні за технологічним процесом споживачі можуть мати різні можливості регулювання енергоспоживання в часі. Крім того, встановлена для певного рівня впливу ціна, може бути суттєвим стимулом тільки для споживачів з високим рівнем витрат на оплату ЕЕ в загальній собівартості продукції ( $B_C$ ) і, водночас, мало цікавити споживачів, у яких  $B_{E.C} < 10 \% B_C$ .

В роботі [5] на основі кластерного аналізу за 9 характеристичними ознаками виокремлюють 3 групи споживачів: з піковим попитом на ЕЕ, з рівномірним попитом та споживачі-компенсатори. За такої методики, при формуванні кластерів, має місце лінгвістична невизначеність, що обумовлює невпевненість експерта щодо розмежування близьких за значенням параметрів.

Застосування теорії нечіткої логіки та нейронних мереж дозволяє забезпечити експерта точною інформацією та підвищити впевненість в прийнятті рішення в умовах лінгвістичної невизначеності. Характерною відмінністю від інших способів розвитку споживачів на групи є також можливість навчання нейро-нечіткої моделі на існуючому статистичному матеріалі, що забезпечить підвищення якості її логічного висновку щодо віднесення споживача до того чи іншого сегменту енергоринку.

Таким чином, наявність значної кількості впливових факторів та показників ускладнює задачу експерта однозначно оцінити та чітко розмежувати значення параметрів (наприклад, значення середнього та високого рівня). В такому разі раціональним є застосування теорії нечіткої логіки, котра розширює класичне поняття множин, припускаючи, що функція належності елемента до множини може набувати будь-якого значення в інтервалі  $[0; 1]$ , а не тільки значень 0 чи 1 [6]. При цьому, сумісне використання нечіткої логіки та нейронних мереж дозволить забезпечити ієрархічність при формуванні правил нечіткого висновку (бази знань) та побудові математичної моделі.

Отже, вдосконалення сегментування споживачів сприятиме дієвості новітніх цінних систем.

**Метою роботи** є визначення системи факторів і показників та розробка

методики сегментування ринку споживачів електричної енергії із використанням теорії нечіткої логіки та нейронних мереж.

**Матеріал і результати дослідження.** Режими енергосистеми характеризуються комплексом параметрів, який складно досліджувати внаслідок різної динаміки характеристичних коефіцієнтів (важко оцінити нерівномірність та степінь впливу режиму окремих електроспоживачів на сумарний графік ЕК чи ОЕС).

Для оцінки степеню важливості споживача для ЕК задіємо алгоритм аналізу, використаний у [7].

Методика комплексного аналізу режиму електроспоживання та поділу споживачів на сегменти з використанням теорії нечіткої логіки складатиметься з наступних етапів.

**Етап 1** (Формування набору показників). Обґрунтуємо вибір сукупності факторів  $X_{ij}$ , де  $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, M_i}$  з  $N$  узагальнених груп з  $M_i$  факторами в кожній  $i$ -й групі.

Таблиця 1 – Фактори визначення сегменту енергоринку

<i>Позначення</i>	<i>Група факторів</i>
$X_1$	кількісні показники електроспоживання;
$X_2$	характер режиму споживання ЕЕ протягом доби;
$X_3$	вплив споживачів на режим роботи ЕК (ОЕС);
$X_4$	технічні можливості регулювання режиму електроспоживання у часі;
$X_5$	фінансово-економічний стан споживача.

Числове значення кожної  $X_{ij}$  може бути визначено із певного набору показників. Так, наприклад, кількісний фактор електроспоживання  $X_1$  може бути оцінений за показниками: обсягу споживання за зимовий режимний день  $X_{11}$ , обсягу споживання за літній режимний день  $X_{12}$  та темпів росту обсягів споживання ЕЕ споживача  $X_{13}$ .

Тобто:

$$X_1 = f_1(X_{11}; X_{12}; X_{13}). \quad (1)$$

Характер режиму споживання ЕЕ протягом доби  $X_2$  може бути визначений на основі коефіцієнту заповнення графіку  $X_{21}$ , коефіцієнту нерівномірності  $X_{22}$  та коефіцієнту форми  $X_{23}$ .

До показників, що характеризують степінь впливу споживачів на режим роботи ЕК (ОЕС)  $X_3$  відносяться: коефіцієнт взаємної кореляції  $X_{31}$  та вплив за потужністю  $X_{32}$ .

Технічні можливості регулювання режиму електроспоживання у часі  $X_4$  характеризуються показниками: гнучкості технологічного процесу  $X_{41}$  та величини можливого зсуву технологічного процесу у часі  $X_{42}$ .

До характеристичних показників фінансово-економічного стану споживача  $X_5$  віднесемо: степінь економічної зацікавленості  $X_{51}$ , рівень сплати споживачів за ЕЕ  $X_{52}$  та динаміку сплати в часі (помісячно, поквартально і т.д.)  $X_{53}$ .

На основі розрахованих значень груп показників (табл. 2) проводиться оцінка рівня важливості даного споживача для ЕК за функцією на виході моделі:

$$Y = f_Y(X_1; X_2; X_3; X_4; X_5). \quad (2)$$

Структура математичної моделі оцінки рівня важливості даного споживача приведена на рис. 1 у вигляді дерева логічного висновку. Видно, що нейронна мережа є багатoshаровим перцептроном з одним внутрішнім шаром, а її вхідні, проміжні та вихідні параметри розглядаються як лінгвістичні змінні, що задані на своїх універсальних множинах і оцінюються за допомогою нечітких термів.

**Етап 2** (Лінгвістичні змінні). Для оцінки та опрацювання лінгвістичних показників  $X_{ij}$  сформуємо єдину шкалу з п'яти якісних термів:  $\omega_5$  – дуже низький рівень показника;  $\omega_4$  – низький рівень;  $\omega_3$  – середній рівень;  $\omega_2$  – високий рівень;  $\omega_1$  – дуже високий рівень показника  $X_{ij}$  (табл. 2).

Для оцінки значень вихідної лінгвістичної змінної  $Y$ , що являє собою повну множину степеня важливості  $\Omega$  споживача для ЕК, будемо використовувати наступні терми:  $\Omega_5$  – дуже низький ступінь уваги;  $\Omega_4$  – низький рівень;  $\Omega_3$  – середній рівень;  $\Omega_2$  – високий рівень;  $\Omega_1$  – дуже високий рівень степеню уваги.

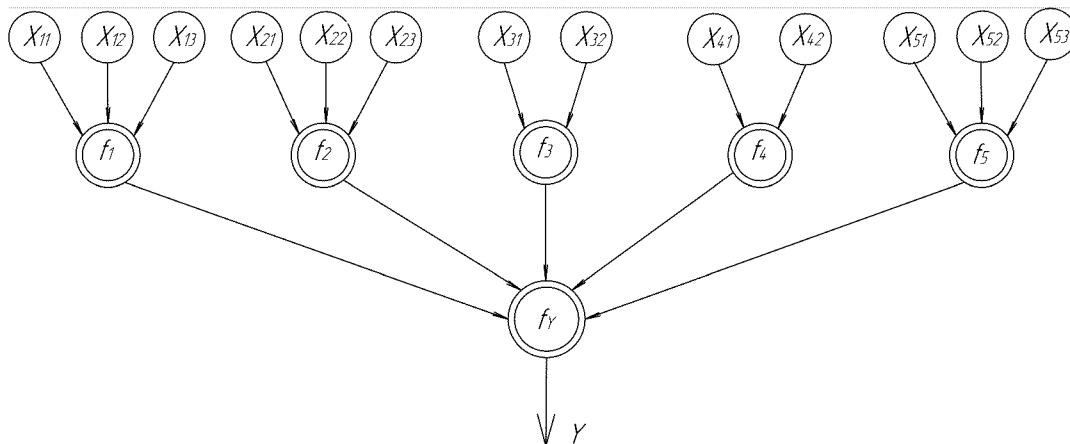


Рисунок 1 - Ієрархічна структура нейро-нечіткої моделі аналізу степеню важливості споживачів

**Етап 3** (Побудова функцій належності). Визначаємо можливий діапазон варіювання контрольованих вхідних параметрів  $X_{ij}$  і вихідної змінної  $Y$  та задаємо вид функцій належності нечітких термів для всіх параметрів. Для встановлення точних

Таблиця 2 – Формування шкали для оцінки значень показників та їх належності до відповідних якісних термів [1, 8]

Групи факторів	Показники	Шкала для оцінки значень показників				
		$\omega 5$	$\omega 4$	$\omega 3$	$\omega 2$	$\omega 1$
Кількісні показники електроспоживання $X_1 = f_1(X_{11}; X_{12}; X_{13})$	обсяг споживання ЕЕ за зимовий режимний день $W_{СП}^3$ , МВт·год	0...65	54...126	114...186	174...246	> 234
	обсяг споживання ЕЕ за літній режимний день $W_{СП}^Л$ , МВт·год	0...44	36...84	76...124	116...164	> 156
	темпи росту обсягів споживання ЕЕ споживача $b = \prod_{i=1}^n (b_i)^{1/n}$ , відн.од.	0...1,01	1...1,27	1,23...1,52	1,48...3,57	$\geq 2,53$
Характер режиму споживання ЕЕ протягом доби $X_2 = f_2(X_{21}; X_{22}; X_{23})$	коефіцієнт заповнення графіку $K_{зГ} = \frac{W_{СПОЖ}}{24 \cdot P_{МАХ}}$	1...0,88	0,82...0,72	0,76...0,42	0,62...0,16	0,32...0
	коефіцієнт нерівномірності $K_{НР} = P_{МІН} / P_{МАХ}$	1...0,76	0,82...0,56	0,62...0,36	0,42...0,16	0,22...0
	коефіцієнт форми $K_{Ф} = P_{СРКВ} / P_{СР}$	1...1,08	1,06...1,18	1,16...1,38	1,36...1,8	$\geq 1,6$
Вплив споживачів на режим роботи ЕК (ОЕС) $X_3 = f_3(X_{31}; X_{32})$	коефіцієнт взаємної кореляції $K_{КОР} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{СП} - P_{СРСП}) \cdot (P_{ЕК} - P_{СРЕК})}{(n-1) \cdot \sigma_{СП} \cdot \sigma_{ЕК}}$	0...0,22	0,18...0,42	0,38...0,62	0,58...0,82	0,78...1
	ступінь впливу за потужністю $\eta = P_{СП} / P_{ЕК(ОЕС)}$	0...0,2	0,1...0,4	0,3...0,6	0,5...0,8	0,7...1
Технічні можливості регулювання режиму електроспоживання у часі $X_4 = f_4(X_{41}; X_{42})$	гнучкість технологічного процесу $\lambda = \Delta V_{МАХ} / V_{МАХ}$	0...0,05	0,03...0,1	0,08...0,22	0,2...0,8	0,8...1
	величина можливого зсуву технологічного процесу $\tau$ , год	0...0,5	0,5...1,5	1...5	4...11	10...12
<b>Фінансово-економічний стан споживача</b> $X_5 = f_5(X_{51}; X_{52}; X_{53})$	економічна чутливість $\xi = C / B_C$	0...0,05	0,03...0,18	0,15...0,4	0,35...0,55	$\geq 0,5$
	рівень сплати споживачів за ЕЕ $I_{ОПЛ} = P_{ФАКТ} / P_H$ , %	100...70	80...50	60...30	40...10	20...0
	динаміка сплати в часі $\varphi = \Delta t / T$	1...1/2	2/3...1/3	2/5...1/5	1/4...1/12	$\geq 1/6$

меж, у яких значення кожного параметра буде однозначно відповідати своїм власним термам, оберемо трапецієподібні функції належності.

На рис.2 наведені функції належності п'яти нечітких термів вхідних факторів  $\{\omega_5; \omega_4; \omega_3; \omega_2; \omega_1\}$  шляхом відображення елементів з множини  $X_{ij}$  на множину чисел в інтервалі  $[0; 1]$ , які й вказують на ступінь належності кожного елемента до різних якісних термів.

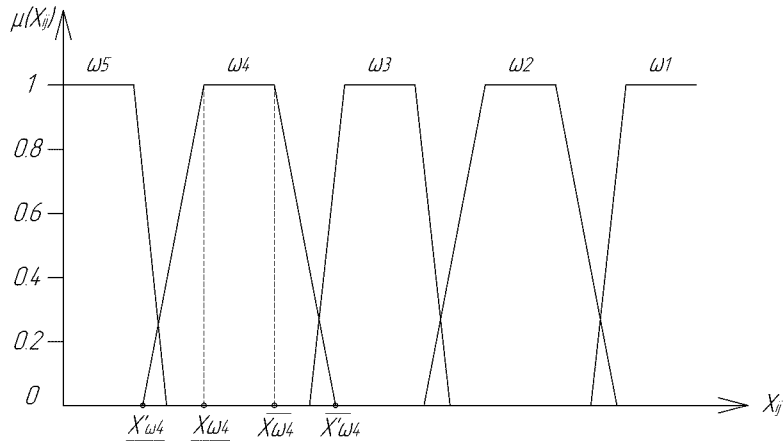


Рисунок 2 - Нечітка змінна  $X_{ij}$  із трапецієподібною функцією належності  $\mu(X_{ij})$

Нижня основа трапецій, наприклад, трапеції « $\omega_4$ »  $[X'_{\omega_4}; \overline{X'_{\omega_4}}]$  охоплює всю припустиму множину значень нечіткого фактора  $X_{ij}$ , верхня  $[X_{\omega_4}; \overline{X_{\omega_4}}]$  – тих значень, для яких експерт встановлює гарантовану відповідність обраному значенню лінгвістичної змінної.

Інтервал  $[X_{\omega_4}; \overline{X_{\omega_4}}]$  є оптимістичною оцінкою параметра  $X_{ij}$ , а інтервал  $[X'_{\omega_4}; \overline{X'_{\omega_4}}]$  – песимістичною. Бічні ребра трапеції відображають зміну ступеня впевненості експерта в його оцінці від 1 до 0. Всі інші значення фактора  $X_{ij}$ , що виходять за межі основи трапеції, однозначно не будуть відповідати обраній лінгвістичній змінній. Для компактного опису трапецієподібної форми нечіткого числа  $X_{ij}$  часто використовують числа виду  $X_{ij} = \langle X'_{\omega_4}; X_{\omega_4}; \overline{X_{\omega_4}}; \overline{X'_{\omega_4}} \rangle$ .

Трапецієподібні функції належності  $\mu(X_{ij})$  для нечіткого терму  $\omega_4$  вхідної змінної, згідно з рис.2, набудуть наступного аналітичного вигляду:

$$\mu(X_{\omega_4}) = \begin{cases} 0, & X < X'_{\omega_4}; \\ \frac{X - X'_{\omega_4}}{X_{\omega_4} - X'_{\omega_4}}, & X'_{\omega_4} \leq X < X_{\omega_4}; \\ 1, & X_{\omega_4} \leq X \leq \overline{X_{\omega_4}}; \\ \frac{\overline{X'_{\omega_4}} - X}{\overline{X'_{\omega_4}} - X_{\omega_4}}, & \overline{X_{\omega_4}} \leq X \leq \overline{X'_{\omega_4}}; \\ 0, & X > \overline{X'_{\omega_4}}. \end{cases} \quad (3)$$

Для решти термів функції належності матимуть аналогічний (3) вигляд.

Основна перевага подібних функцій полягає в тому, що експерт апріорно може задати межі, належність до яких буде однозначно визначати відповідність змінної певному терму. Функції належності та міжнейронні зв'язки налаштовуються шляхом навчання моделі на реальних даних із використанням алгоритму налаштування нейронних мереж «extended delta-bar-delta», адаптованого для нечітких систем [6].

Аналогічним чином будуються функції належності нечітких термів  $\{\Omega_5; \Omega_4; \Omega_3; \Omega_2; \Omega_1\}$  вихідної змінної  $Y$ .

**Етап 4** (Формування набору правил). Експертна система на базі нечітких знань повинна містити механізм нечітко-логічного висновку щодо необхідного степеню уваги до споживача з боку ЕК.

При формуванні бази знань експерту необхідно задати ключові правила, а всі інші правила прийняття рішень генеруватимуться при навчанні моделі на реальних даних. З одного боку, чим точніше описуватиметься кожний споживач за допомогою логічних правил, тим точніше буде проведена його діагностика та розподіл до певного сегменту. А з іншого – перебір всіх можливих правил позбавляє систему гнучкості і можливості адаптації до реальних даних.

**Етап 5** (Оцінка рівня показників). На даному етапі проводиться оцінка поточного рівня показників  $X_{ij}$  та  $Y$ . Значення контрольованих параметрів  $X_{ij}$ , що точно потрапляють у задані для них інтервали  $[X_{ij}; \overline{X_{ij}}]$ , будуть однозначно відповідати їхнім термам. Якщо ж значення знаходиться в проміжку між двома термами, то воно буде відповідати тому терму, функція належності якого для даного рівня показника є більшою.

Реалізація етапів 1-5 дозволяє отримати лінгвістичний опис рівня уваги до окремих споживачів, а також характеристику якості отриманих тверджень.

## Висновки

1. Вдосконалення сегментування дозволить:
  - забезпечити більш детальне дослідження споживачів в рамках одного сегменту;
  - враховувати специфіку споживачів різних сегментів при формуванні диференційованої цінової політики;
  - підвищити ефективність маркетингових комунікацій;
  - збільшити точність оцінки ефективності цінових рішень ЕК.
2. Нейро-нечітке моделювання дозволяє проводити навчання моделі на існуючому статистичному матеріалі для підвищення якості її логічного висновку щодо віднесення споживача до того чи іншого сегменту енергоринку. Розроблена нейро-нечітка модель є гнучкою, логічною, універсальною щодо змін, а споживачі, проранжовані із її використанням будуть віднесені до відповідного сегменту не на основі суб'єктивних оцінок, а згідно з їх функціями належності.
3. Підсилення реакції споживача та забезпечення прямого економічного впливу на формування попиту на ЕЕ потребує подальшого удосконалення цінової системи.

## Список літератури

1. Серебренніков Б.С. Сегментування роздрібного ринку електроенергії / Б.С. Серебренніков // Наукові праці ДонНТУ. Серія: економічна. Вип. 68. – Донецьк: ДонНТУ, 2003. – С. 76 – 82.
2. Дерзкий В.Г. Формирование тарифов на электроэнергию, дифференцированных по классам напряжения и группам потребителей / В.Г. Дерзкий, Н.Э. Рачин // Энергетика и электрификация. – 1996. – № 5. – С. 32 – 36.

3. Крикавський Є. Маркетинг енергозабезпечення: Монографія /Є. Крикавський, Н. Косар, Л. Мороз. – Львів: „Львівська політехніка”, 2001. – 196 с.
4. Методика встановлення ступінчастих тарифів на електричну потужність диференційованих за групами споживачів та періодами часу. – К.: НТУУ "КПІ", 1997. / Рукопис деп. в ДНТБ України 24.11.97 №576-Ук-97/.
5. Панасюк М.П. Особливості проведення аналізу нерівномірності споживання електроенергії / М.П. Панасюк, А. І. Замулко // Зб. матеріалів НТК «Енергетика. Екологія. Людина»: Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ. – Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2012. – С. 153 – 165.
6. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений: Пер. С англ. / Л.Заде. – М.: Мир, 1976. – 167 с.
7. Матвійчук А.В. Аналіз та прогнозування розвитку фінансово-економічних систем із використанням теорії нечіткої логіки. / А.В. Матвійчук. – К.: Центр навчальної літератури, 2005. – 206 с.

*Е. Петрова, С. Серебрянников, А. Сириков*

#### **Нейро-нечеткое сегментирование розничного рынка электроэнергии**

Приведена методика сегментирования розничного рынка электрической энергии с использованием нейро-нечеткого моделирования. Сформированы факторы, которые легли в основу сегментирования по критерию важности потребителя для энергоснабжающей компании. Определены нечеткие границы принадлежности характеристических показателей к качественным термам.

*K. Petrova, S. Serebrennikov, O. Sirikov*

#### **Neuro-fuzzy segmentation of the retail electricity market**

Showed the method of segmenting the retail electricity market using neuro-fuzzy modeling. Formed factors that formed the basis for segmenting consumers on the criterion of importance for power supply company. Identified undefined boundaries belonging to the characteristic parameters by qualitative terms.

Одержано 15.09.12