

МОДЕЛЮВАННЯ ГРАФІКІВ НАВАНТАЖЕННЯ ПРОСЬЮМЕРА НА БАЗІ ПОВЕДІНКОВОГО ПІДХОДУ

У статті проаналізовано різні підходи до моделювання добових графіків електричного навантаження та запропоновано методику вдосконалення поведінкової моделі навантаження побутових споживачів типу «знизу-вгору». Метод заснований на усередненні згенерованих графіків випадкового навантаження для даного типу домогосподарств в певний день року. Усереднення проводиться за сезоном та тривалості світлового дня. Далі в кожному інтервалі виділяються робочі дні та вихідні. Незважаючи на певні відмінності, ця робота не розділяє свята, суботу та неділю, щоб уникнути зайвих деталей. Обрані параметри розбиття інтервалів усереднення дозволяють отримати досить компактний набір модельних даних і при цьому зберегти особливості навантаження в різні дні року і години доби. Розглянуто побутові графіки навантаження з різним кроком розподілу дня та основну відмінність такого розподілу. Побудовано моделі для двох типів домогосподарств, які точніше передають спорадичний характер споживання просьюмерів порівняно з типовими графіками навантаження. Усереднені графіки навантаження підходять для моделювання режимів роботи та алгоритмів керування системою генерації і зберігання енергії просьюмерів.

Ключові слова: графік навантаження, споживання електроенергії домогосподарств, моделювання навантаження, просьюмер.

Вступ

В останнє десятиліття проблема управління зростаючою кількістю нестабільних відновлюваних джерел енергії, таких як фотоелектричні системи (ФЕС), а також мінливим попитом на електроенергію з боку нових споживачів, таких як електромобілі та індивідуальні системи зберігання енергії, стала особливо актуальною. Вирішенню цієї проблеми присвячено безліч досліджень з різними підходами [1], аналіз яких показує, що споживання домогосподарств та виробництво енергії в житловому секторі все ще недостатньо вивчені та слабо контрольовані процеси в енергосистемі. У той же час енергосистеми стикаються з появою нового учасника – просьюмерів, тобто побутових абонентів, здатних не тільки споживати, а й генерувати енергію.

На відміну від промисловості, сільського господарства і транспорту, побутова електроенергетика характеризується набагато більшою різноманітністю факторів впливу і внутрішніх особливостей. Крім клімату, фізичних характеристик житла і використовуваних електроприладів, вирішальний вплив на споживання енергії домогосподарством має поведінка людей [2]. Ці ж фактори впливають на потужність, що подається в мережу від окремих дахових фотоелектричних станцій.

Традиційні методи моделювання споживача енергії спираються на дані про всі наявні у них електроприймачі або на історію їх загального енергоспоживання. Вони використовуються для розрахунку або прогнозування майбутнього споживання енергії. Ці методи мають різні сильні й слабкі сторони та застосування, але всі вони вимагають великої кількості точних і детальних даних про споживачів. У випадку домогосподарств збір таких даних ускладнюється як великою кількістю даних, так і вимогами конфіденційності. А з появою нових типів споживачів, таких як електромобілі та домашні системи накопичення енергії, ще й проблемами, пов'язаними з відсутністю достатньо довгою передісторією даних про їх використання.

У зв'язку з цим актуальною стає розробка методів моделювання навантаження побутових споживачів і просьюмерів, здатних точно передати особливості графіків навантаження існуючих споживачів і нових, які нещодавно підключилися до енергосистеми.

Методи моделювання. В цілому методи моделювання енергоспоживання домогосподарств можна розділити на дві категорії: «зверху-вниз» і «знизу-вгору» [3]. Моделі «зверху-вниз» оцінюють сумарне енергоспоживання житлового сектора енергосистеми країни або регіону і перетворюють додаткові параметри в дані про енергоспоживання конкретного побутового споживача. Вони можуть відносно легко враховувати зміни макроекономічних показників, таких як ціни на енергоносії та доходи, а також темпи розвитку технологій та зміни клімату. Моделі «знизу-вгору», з іншого боку, описують споживання енергії окремими споживачами або будинками, а потім екстраполюють ці результати на рівень міста, регіону або країни [4]. Такі моделі спираються на історію енергоспоживання.

Яскравим прикладом моделей «зверху-вниз» є типові графіки електричних навантажень [5,6]. Зазвичай вони будуються на основі даних режимного дня або на усереднених даних репрезентативних споживачів. До цього типу моделей відноситься модель навантаження просьюмера, яку ми раніше використовували в [7], для моделювання роботи розумної системи котеджного селища. Однак такі моделі, як «зверху вниз» можуть бути більш складними. Наприклад, у США «Національна система енергетичного моделювання» для середньострокового прогнозування та аналізу енергетичної політики включає економічну модель споживання енергії житловим фондом [6]. Дана модель враховує парк побутової техніки, стан зовнішнього огороження будівель і розвиток розподіленої генерації. Складова парку побутової техніки оцінює термін служби та насиченість нею [8]. Компонент розподіленої генерації оцінює вартість фотоелектричних модулів, їх продуктивність та ступінь поширення. Однак, незважаючи на те, що моделі «зверху-вниз» добре описують вплив макрозмінних на загальну зміну споживання електроенергії, вони абстрагуються від деталей внутрішньодобових змін графіка навантаження і описують їх дуже приблизно [9].

При використанні підходу «знизу-вгору» об'єктом дослідження є кінцевий споживач, а основна увага приділяється побудові закономірностей споживання для кожного з його електроприймачів [10,11]. Методи «знизу-вгору» забезпечують високу точність при моделюванні добового графіка навантаження споживача, але вимагають великої кількості даних. Раніше це було серйозною перешкодою для їх застосування, але з розвитком автоматизованих систем обліку для енергетичних компаній і поширенням різних інтелектуальних систем в домогосподарствах, обсяг наявних даних про електричне навантаження кінцевих споживачів стрімко зріс [12].

Як математичний інструмент моделювання навантаження «знизу вгору» широко використовуються методи регресійного аналізу. Наприклад, в [13] множинна лінійна регресія використовується для прогнозування споживання електроенергії та максимального навантаження домогосподарства в залежності від типу будівлі, кількості спалень та складу сім'ї. А в [14] запропоновано функціональну векторну модель авторегресійного простору станів для прогнозування попиту на електроенергію, що дає можливість агрегувати її до рівня регіональної або національної енергосистеми. Штучні нейронні мережі також широко використовуються для побудови регресійних моделей [11].

Проте, при вивченні режимів споживання нового абонента без історії даних про його навантаження, як у випадку моделювання роботи розумної мережі просьюмерів в новому котеджному селищі [7], вкрай складно побудувати звичайні регресійні моделі. У цьому випадку найбільш перспективним видається підхід, запропонований в [14]. Це множинна регресія, що включає поведінкові патерни використання електроприладів у побуті. У цій моделі кожен мешканець домогосподарства розглядається як незалежний агент, керований власними бажаннями та звичними моделями поведінки.

Відповідно до психологічної моделі поведінки, запропонованої німецьким психологом Д. Дьорнером [15], в будь-який момент часу люди приймають рішення (в тому числі і про використання електроприладів), виходячи зі своїх поточних бажань і вибираючи оптимальну дію з наявних варіантів. Модель поведінкового навантаження [16] використовує спрощені моделі бажань побутового споживача електроенергії. Наприклад, кожні 5 годин у людини з'являється бажання поїсти, а вранці робочого дня у нього з'являється бажання вийти на роботу. Вибір доступних дій для людини як споживача енергії, який прагне задовольнити свої бажання, залежить від наявних у домогосподарстві пристроїв. Це може бути мікрохвильова піч, електрочайник, лампи, водонагрівачі тощо. Природно, що момент виникнення бажання та вибір способів його задоволення є випадковими величинами з певними законами розподілу ймовірностей.

Як показали дослідження, підхід, використаний в моделі [16], добре підходить для формування реалістичних профілів навантажень різних домогосподарств, які точно відображають особливості їх реальних графіків навантажень: розташування і форму максимумів і мінімумів навантажень, кількість та величину стрибків навантаження, коефіцієнти форми і заповнення графіків. На його основі створено і розробляється програмний комплекс з відкритим вихідним кодом «Load Profile Generator» (LPG) [17].

Мета та завдання

Метою цієї роботи є удосконалення методу побудови графіків навантаження споживачів-просьюмерів на основі поведінкового підходу. Предметом дослідження є моделі побутового навантаження, придатні для вирішення задачі управління роботою вузла розумної мережі котеджного селища просьюмерів.

Матеріал і результати досліджень

Раніше в [7] для цієї мети використовувалися стандартні графіки навантаження середньостатистичної сім'ї, що складається з двох працюючих дорослих і двох дітей. Однак ці графіки

занадто плавні, що може призвести до того, що алгоритми управління не зможуть впоратися з різко мінливим характером реальних профілів навантаження. Оскільки реальних архівних даних про енергоспоживання досліджуваного споживача немає, для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати поведінкову модель навантаження [16]. Однак пряме використання графіків, отриманих за допомогою LPG, також не відповідає поставленому завданню. Кожен згенерований графік LPG є випадковим, унікальним і може істотно відрізнятися від інших реалізацій з точки зору заповнення: величини і часу максимумів і мінімумів вторинного навантаження, як показано на рис. 1. Такі відхилення можуть бути пов'язані, наприклад, з хаотично розподіленими рішеннями членів сім'ї приготувати їжу, випрати одяг або вийти з дому. Вони є невід'ємною частиною поведінкової моделі.

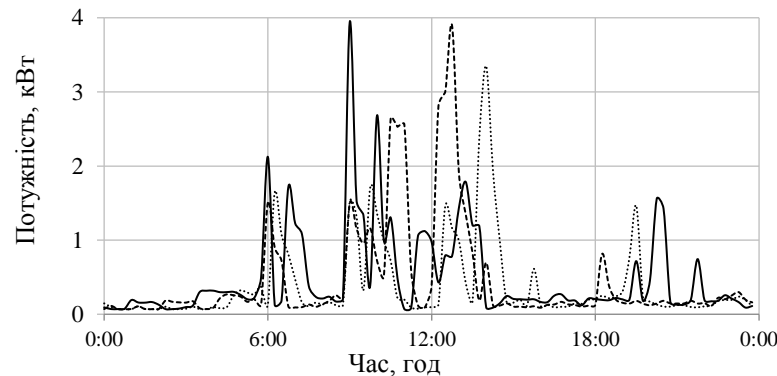


Рисунок 1 - Різні реалізації графіків випадкового навантаження за LPG [16]

Разом с тим для налаштування алгоритму управління розумним вузлом мережі потрібен графік навантаження, який повторюється, відображає специфіку реального споживання, але позбавлений нетипових відхилень.

Метод усереднення графіків навантаження

Для отримання такого графіка пропонується усереднити згенеровані LPG випадкові профілі навантаження, на певних інтервалах часу. Для побудови моделі навантаження введено кілька рівнів розбиття даних на часові інтервали.

На першому рівні весь рік ділиться на часові проміжки, протягом яких тривалість світлового дня (ТСД) не змінюється більш ніж на 15 хвилин. Можна припустити, що в межах кожного інтервалу режими використання освітлювальних приладів не змінюються. Для широти Харкова налічується 24 таких інтервалу тривалістю 10-26 днів.

Далі, в кожному інтервалі виділяються робочі дні та вихідні. Для розглянутих побутових споживачів характерною особливістю графіка завантаження вихідного дня є наявність ранкових та денних максимумів навантаження, близьких за величиною до вечірнього максимального завантаження робочих днів. Незважаючи на певні відмінності споживання, в рамках цього дослідження вихідні дні не поділяються на свята, суботу та неділю, щоб уникнути зайвої деталізації.

Таким чином, графік навантаження на конкретний день року визначається як

$$P_M(d, t_k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{c,i}(d_i, t_k), \quad (1)$$

де

P_M – середня потужність навантаження;

d – номер поточного дня року;

t_k – номер поточного інтервалу доби;

n – кількість усереднених реалізацій згенерованого LPG графіка навантаження;

$P_{c,i}$ – потужність навантаження відповідно до i -ї реалізації графіка навантаження;

d_i – номер i -го дня року, який належить до того ж інтервалу ТСД, що й d .

Елементи множини $\{d_i\}$, $i = \overline{1, n}$ випадковим чином вибираються серед номерів днів року, що належать до одного і того ж інтервалу ТСД, що й d . При цьому значення d_i можуть повторюватися, оскільки відповідні реалізації графіків випадкових навантажень $P_{c,i}(d_i, t)$ будуть відрізнятися.

Кількість усереднених реалізацій згенерованого графіка навантаження n може змінюватися в залежності від бажаного ступеня згладжування середнього графіка. Для цієї задачі обрано значення $n = 24$.

Як видно з (1), для побудови графіка навантаження добу розбивають на часові проміжки з постійними кроками Δt :

$$t_k - t_{k-1} = \Delta t. \quad (2)$$

Відповідно до поставленого завдання і можливостей LPG, величину Δt можна обрати в діапазоні від 1 до 60 хвилин.

На рис. 2 наведені графіки середньої потужності навантаження $P_M(t_k)$, побудовані при $\Delta t = 1$ хв, $\Delta t = 5$ хв та $\Delta t = 15$ хв. Як видно, чим менше значення Δt , тим більш нерівномірним є графік $P_M(t_k)$, тим більше в ньому коливань навантаження. У той же час графіки для $\Delta t = 1$ хв та $\Delta t = 5$ хв відрізняються між собою набагато сильніше, ніж для $\Delta t = 5$ хв та $\Delta t = 15$ хв. Основна відмінність виявляється при переході від $\Delta t = 5$ хв до $\Delta t = 1$ хв і полягає у прояві на графіку навантаження коливань, пов'язаних зі ступінчастим або релейним характером законів управління більшості потужних побутових електроприладів.

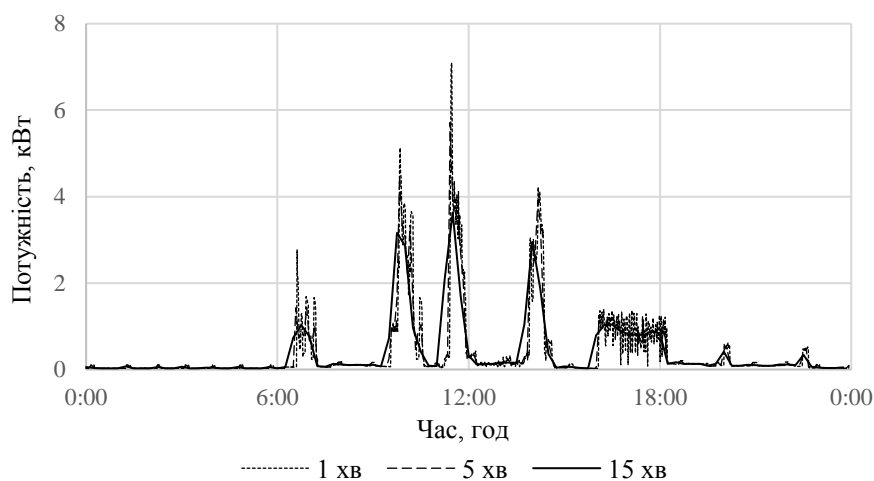


Рисунок 2 - Графіки усередненого навантаження з різним кроком розподілу дня Δt

Менший крок Δt більш детально передає спорадичний характер побутового навантаження, але також означає більшу кількість точок в моделі $P_M(t_k)$, більше даних для зберігання та обробки, і, як результат, повільніше моделювання процесів в об'єкті споживача. Крім того, управління вузлом розумної мережі має бути обмежене щодо кількості перемикачів режимів заряду/розряду системи накопичення енергії, а також урахувати інтервали роботи енергоринку. Тому в цьому дослідженні для моделі навантаження $P_M(t_k)$ обрано значення кроку $\Delta t = 15$ хв.

Визначивши таким чином параметри поділу на інтервали усереднення часу для моделі (1), було отримано графіки навантаження для побутових споживачів, які проживають у котеджному селищі Харківської області. В якості тестового об'єкту дослідження вибрано широко розповсюджений тип сім'ї з сучасним обладнанням, яке відповідає сучасним уявленням про комфорт і розвиток техніки.

На рис. 3 представлений графік добового навантаження для котеджного будинку з трьома мешканцями (крива 1) за один сезон року, який використовувався в дослідженні [7]. Він будується за стандартними графіками навантаження великої групи побутових споживачів. Його недоліком є те, що профіль занадто гладкий, що пов'язано з високим рівнем усереднення при побудові графіка методом «зверху-вниз». Крива 2 на рис. 3 показує приклад одиночної реалізації графіка навантаження, що генерується LPG для того ж тестового сімейства. Як видно, він має більше другорядних піків з більшим розмахом і крутішими фронтами. Крива 3 на цьому малюнку є прикладом графіка середньодобового навантаження, розрахованого за моделлю (1). Добове енергоспоживання всіх цих графіків навантаження однакове.

Як видно, крива 3 на рис. 3 займає проміжне положення між кривими 1 і 2. Усереднений графік містить багато вторинних піків, зосереджених в області ранкового і вечірнього максимумів, а також піків в інші години доби, які характерні для графіків навантаження домогосподарств. Ця характеристика моделі навантаження дуже важлива, коли вона використовується для налаштування алгоритму управління індивідуальною системою накопичення енергії просьюмера.

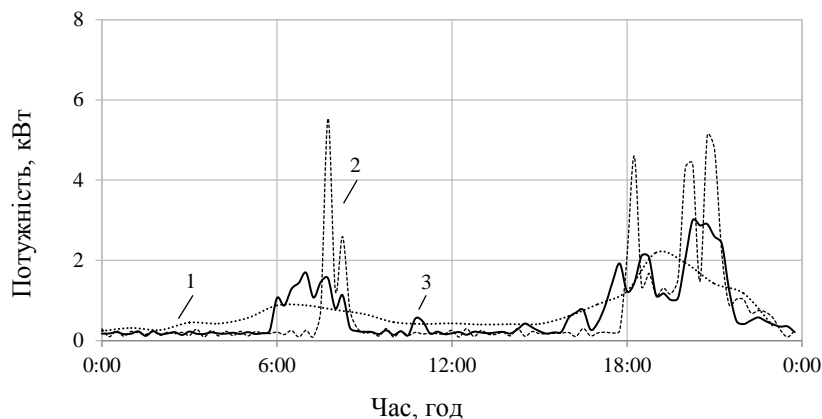


Рисунок 3. Графіки моделей навантаження: 1 – типовий [7]; 2 – LPG [16]; 3 – усереднений (1)

З іншого боку, крива 3 на рис. 3 має в 2-3 рази менший діапазон коливань потужності навантаження, ніж крива 2 через усереднення. Це означає, що вона не передає піки навантаження, пов'язані з одночасним й короткочасним використанням потужної побутової техніки. Тим не менш, такий недолік запропонованої моделі є прийнятним, оскільки такі різкі скачки навантаження зазвичай компенсуються енергетичним буфером, підключеним паралельно до основної літій-іонної батареї в системі накопичення енергії просьюмера. Оскільки запропонована модель навантаження (1) використовується для вибору алгоритму управління основним акумулятором, можна вважати, що вона точно передає всі особливості енергоспоживання просьюмера в рамках поставленого завдання.

Графіки навантаження різних типів сімей

В ході проведення досліджень, за допомогою програмного комплексу LPG, було вивчено та змодельовано графіки споживання електричної енергії різних типів сімейств. Для прикладу наділі будуть наведені два типи сімейств. Перший тип сімейства включає в себе двоє працюючих дорослих: жінка 35 років та чоловік 36 років. Другий тип сімейства включає в себе двоє працюючих дистанційно, з власного будинку, дорослих: жінка 39 років, чоловік 40 років та двоє маленьких дітей: хлопчик 9 років та дівчинка 14 років.

Склад побутового обладнання сімей є досить обширним та налічує понад 43 пристрої, попередньо обрані на основі досліджень ринку. Прийнято, що будинки обладнані газовою системою опалення та гарячого водопостачання. Для кожного типу сім'ї приведено два графіки навантаження: згенерований за допомогою LPG та усереднений.

На рис. 4 зображено усереднений графік навантаження сім'ї першого типу взимку у робочій та вихідний день.

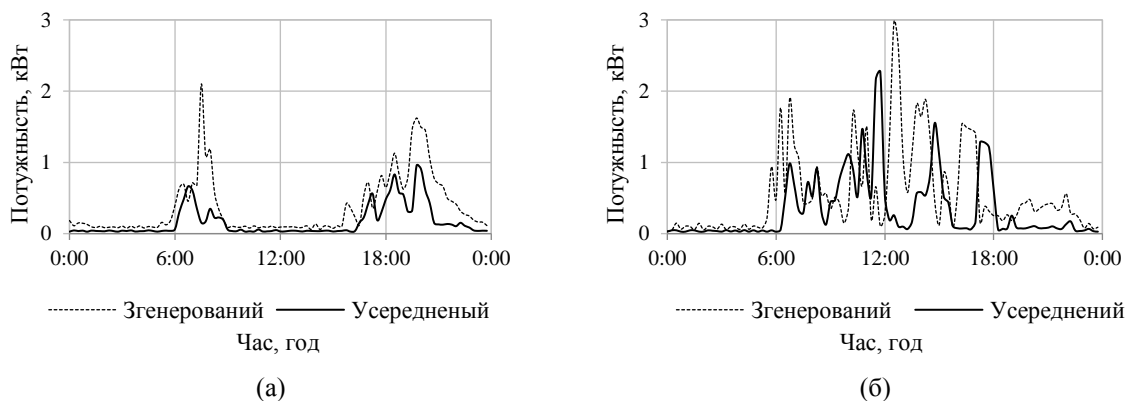


Рисунок 4 – Графік навантаження сім'ї першого типу взимку в робочій день (а) та вихідний день (б)

Детальний аналіз кривої усередненого графіка навантаження робочого дня рис. 4 (а) показує, що попит починає зростати після 6:00 години ранку та сягає свого піку о 6:30 та 7:30 у випадку усередненого і згенерованого графіків, відповідно, коли члени сім'ї прокидаються та починають збиратися на роботу. Після того, як члени сім'ї поїхали на роботу навантаження падає до мінімального значення. Знову попит починає зростати о 16:00 для згенерованого графіку та о 17:00 години для усередненого режиму. Вечірній пік спостерігається о 20:00 та поступово спадає.

Графіки навантаження вихідного дня, що зображені на рис. 2.5 (б) показують, що споживання електричної енергії починається о 5:45 та 6:00 у випадках згенерованого та усередненого графіків відповідно, та сягають своїх ранкових піків о 6:30. Обідній пік в усередненому графіку настає об 11:30, а в згенерованому навантаженні о 12:30, після, у випадку усередненого графіка навантаження падає до мінімальних значень, а у випадку згенерованого графіка залишається на значному рівні. Через поведінковий фактор коефіцієнт максимум на усередненому графіку є більшим за згенерований як показано в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики графіків навантаження сім'ї першого типу взимку

День	Робочій день		Вихідний день	
	Усереднений	Згенерований	Усереднений	Згенерований
Тип споживання				
Середнє значення	0,21	0,37	0,35	0,57
Коефіцієнт максимуму	5,88	5,81	6,56	5,21
Коефіцієнт заповнення	0,17	0,25	0,16	0,18
Коефіцієнт форми	1,67	1,49	1,68	1,45

На рис. 5 зображено графіки навантаження сім'ї другого типу взимку.

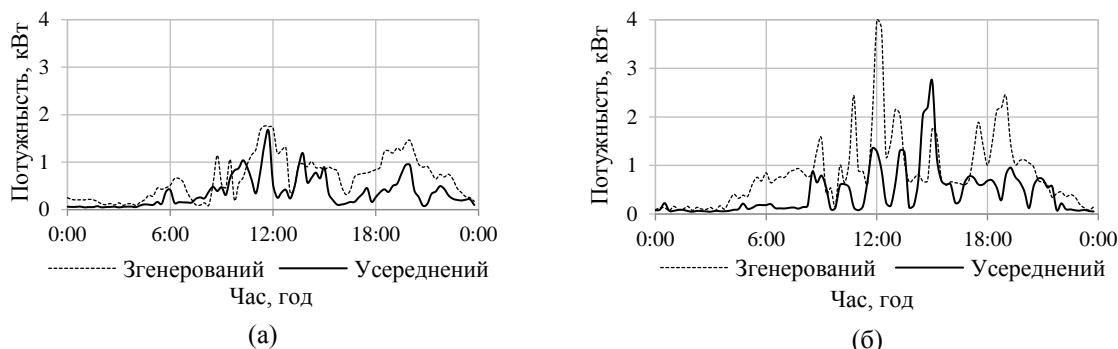


Рисунок 5 – Графіки навантаження сім'ї другого типу взимку в робочій день (а) та вихідний день (б)

Детальний аналіз кривої усередненого графіка навантаження робочого дня рис. 5 (а) показує, що попит на навантаження починає зростати після 4:30 години ранку та сягає свого піку о 8:45 та 10:30 у згенерованому та усередненому режимах відповідно. Потім, у випадку обох графіків, о 12:00 спостерігається обідній пік, після чого навантаження падає, а другий пік спостерігається о 14:15. Знову попит починає зростати о 18:00 та сягає свого вечірнього максимуму та 19:45 у випадку обох графіків та починає поступово падати.

Графіки навантаження вихідного дня, що зображені на рис. 5 (б) показують, що споживання електричної енергії починається о 5:00 та 8:00 у випадках згенерованого та усередненого графіків відповідно, та сягають своїх ранкових піків о 9:00. Обідній пік на усередненому графіку настає об 12:00 після якого настає ще один пік о 15:00 у випадку обох графіків. Після чого спостерігається вечірній пік в 19:00 у випадку інтенсивного графіка. Далі навантаження поступово починає падати до мінімальних значень. В робочому та вихідному дні коефіцієнти максимум та форми є більшими за аналогічні в згенерованому графіку, як наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристики графіків навантаження сім'ї другого типу взимку

День	Робочій день		Вихідний день	
	Усереднений	Згенерований	Усереднений	Згенерований
Тип споживання				
Середнє значення	0,34	0,64	0,42	0,76
Коефіцієнт максимуму	4,59	3,15	6,34	4,39
Коефіцієнт заповнення	0,22	0,33	0,16	0,23
Коефіцієнт форми	1,34	1,21	1,51	1,31

В цілому, усереднені графіки споживання досить точно відображають спорадичний характер споживання, особливо у випадку першої сім'ї. Разом з тим, усереднені графіки є згладженими та не мають гострих піків, при цьому їх фронти є ширшими ніж у аналогічних згенерованих графіків. Усього для одного типу сім'ї розраховується 16 усереднених добових графіків навантаження для різних періодів року.

Висновки

Відповідно до отриманих результатів та проведеного аналізу можна стверджувати, що поведінка людини відіграє значну роль у енергоспоживанні. Так, за даними LPG, лише чверть енергоспоживання є автономним і не залежить від людини та її поведінки, решта 75% - результат її свідомої діяльності. У випадку сім'ї першого типу можна спостерігати значні ранкові та вечірні піки в робочі дні, в той час, коли сім'я другого типу навпаки споживає більшу частину енергії в обідній час. В першу чергу, це пояснюється режимом роботи обох сімей та їх складом. В вихідні дні різниця в енергоспоживанні є менш явною, проте кількість різних варіантів енергоспоживання зростає. Всі ці фактори суттєво впливають на графіки навантаження побутових споживачів, і їх обов'язково слід враховувати при моделюванні параметрів роботи енергосистеми.

Запропонований метод моделювання навантаження побутових споживачів «знизу вгору» шляхом усереднення випадкових графіків, що генеруються поведінковою моделлю, дозволяє отримати графіки навантаження, які більш точно передають спорадичний характер споживання домогосподарств, ніж типові графіки, побудовані методами «зверху-вниз». Обрані параметри розбиття інтервалів усереднення дозволяють отримати досить компактний набір модельних даних і при цьому зберегти особливості навантаження в різні дні року і години доби, необхідні для моделювання режимів роботи і алгоритмів управління системою генерації і зберігання енергії споживачів-просьюмерів.

Список використаної літератури

1. Siano, P. Demand response and smart grids—A survey / *Renewable and sustainable energy reviews* 30, 2014, p. 461-478.
2. Miller, W.; Senadeera, M. Social transition from energy consumers to prosumers: Rethinking the purpose and functionality of eco-feedback technologies. *Sustain. Cities Soc.* 2017, 35, 615–625.
3. Espe, E.; Potdar, V.; Chang, E. Prosumer communities and relationships in smart grids: A literature review, evolution and future directions. *Energies* 2018, 11, 2528.
4. Івахнов А. В., Кулапін О. В., Данильченко Д. О., Федорчук С. О., Гриценко В. В. Дослідження перспектив застосування соціо-демографічних даних для аналізу потенціалу керування попитом. *Вісник НТУ "ХПІ" – Харків : НТУ "ХПІ", 2022. – № 1 (4). – С. 11-16.*
5. Wilkerson, J. T., Cullenward, D., Davidian, D., Weyant, J. P. End use technology choice in the National Energy Modeling System (NEMS): An analysis of the residential and commercial building sectors. / *Energy Economics*, 40, 2013, p.773-784.
6. Energy Information Administration (EIA), 2010c. Model documentation report: residential sector demand module of the National Energy Modeling System. Report No DOE/EIA-M067(2010)/
7. Кулапін О. В., Махотіло К. В. Моделювання смарт-мережі споживачів-просьюмерів з фотоелектричними системами. *Вісник НТУ "ХПІ" – Харків : НТУ "ХПІ", 2019.– № 14 (1339).– С. 61-66.*
8. Huber M, Dimkova D, Hamacher T. Integration of wind and solar power in Europe: assessment of flexibility requirements. *Energy* 2014;69:236–46.
9. R. Pal, C. Chelmiss, M. Frincu and V. Prasanna, "MATCH for the prosumer smart grid the algorithmics of real-time power balance", *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 27, no. 12, pp. 3532-3546, Dec. 2016.
10. Chuan, L., & Ukil, A. (). Modeling and validation of electrical load profiling in residential buildings in Singapore. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(5), 2014, p. 2800-2809.
11. S. M. Souza, M. Gil, J. Sumaili, A. G. Madureira and J. A. P. Lopes, "Operation scheduling of prosumer with renewable energy sources and storage devices", *Proc. 13th Int. Conf. Eur. Energy Market*, pp. 1-5, Jun. 2016.
12. McLoughlin F., Duffy A., Conlon M. Characterising domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: An Irish case study / *Energy and buildings*, 48, 2012, p. 240-248.
13. Nagbe, K., Cugliari, J., & Jacques, J. Short-term electricity demand forecasting using a functional state space model. / *Energies*, 11(5), 2018, 1120, <https://doi.org/10.3390/en11051120>.
14. A. Paudel, K. Chaudhari, C. Long and H. B. Gooi, "Peer-to-peer energy trading in a prosumer-based community microgrid: theoretic model", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 8, pp. 6087-6097, Aug. 2019.
15. Dörner, D., *Bauplan für eine Seele*. 1. Aufl ed. 1999, Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Verl. 831 S.
16. Pflugradt N., Muntwyler U. Synthesizing residential load profiles using behavior simulation / *Energy Procedia*, 122, 2017. p. 655–660.
17. Pflugradt, N., and B. Platzer. "Behavior based load profile generator for domestic hot water and electricity use." 12th International Conference on Energy Storage (Innostock), Lleida, Spain. 2012.

O. Kulapin¹, assistant, ORCID: 0000-0001-9283-6910

K. Makhotilo¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID: 0000-0001-7081-071X

¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

MODELING OF PROSUMER LOAD PROFILES BASED ON BEHAVIORAL APPROACH

The article analyzes various approaches to the modeling of daily electricity load schedules and proposes a methodology for improving the "bottom-up" behavioral model of the load of household consumers. The method is based on averaging generated random load schedules for a given type of household on a particular day of the year. Averaging is carried out by season and length of daylight. Next, working days and weekends are distinguished in each interval. Despite some differences, this work does not separate holidays, Saturdays, and Sundays to avoid unnecessary details. The selected parameters for dividing the averaging intervals allow you to obtain a relatively compact set of model data and, at the same time, preserve the features of the load on different days of the year and hours of the day. Household load profiles with varying steps of day distribution and the main difference of such distribution are considered. Models that more accurately convey the sporadic nature of prosumer consumption compared to typical load schedules are built for two types of households. A detailed analysis of the averaged load graphs was carried out in comparison with the typical graph and the generated load graphs. Averaged load schedules are suitable for modeling the operating modes and control algorithms of the prosumer energy generation and storage system.

Key words: load profile, household electricity consumption, load modeling, prosumer.

References

1. Siano, P. Demand response and smart grids—A survey / Renewable and sustainable energy reviews 30, 2014, p. 461-478.
2. Miller, W.; Senadeera, M. Social transition from energy consumers to prosumers: Rethinking the purpose and functionality of eco-feedback technologies. *Sustain. Cities Soc.* 2017, 35, 615–625.
3. Espe, E.; Potdar, V.; Chang, E. Prosumer communities and relationships in smart grids: A literature review, evolution and future directions. *Energies* 2018, 11, 2528.
4. D. Danylchenko, S. Fedorchuk, O. Kulapin, A. Ivakhnov, V. Hrytsenko. Research on Demographically Based Electricity Demand Schedules for the Potential of Demand Management. *Visnyk NTU "KhPI"*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022. – № 1 (4). – С. 11-16.
5. Wilkerson, J. T., Cullenward, D., Davidian, D., Weyant, J. P. End use technology choice in the National Energy Modeling System (NEMS): An analysis of the residential and commercial building sectors. / *Energy Economics*, 40, 2013, p.773-784.
6. Energy Information Administration (EIA), 2010c. Model documentation report: residential sector demand module of the National Energy Modeling System. Report No DOE/EIA-M067(2010).
7. Kulapin O. , Makhotilo K. Modeling smart networks of prosumer consumers with photovoltaic systems. *Visnyk NTU "KhPI"*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019.–№ 14 (1339).–S. 61-66.
8. Huber M, Dimkova D, Hamacher T. Integration of wind and solar power in Europe: assessment of flexibility requirements. *Energy* 2014;69:236–46.
9. R. Pal, C. Chelms, M. Frincu and V. Prasanna, "MATCH for the prosumer smart grid the algorithmics of real-time power balance", *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 27, no. 12, pp. 3532-3546, Dec. 2016.
10. Chuan, L., & Ukil, A. (). Modeling and validation of electrical load profiling in residential buildings in Singapore. / *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(5), 2014, p. 2800-2809.
11. S. M. Souza, M. Gil, J. Sumaili, A. G. Madureira and J. A. P. Lopes, "Operation scheduling of prosumer with renewable energy sources and storage devices", *Proc. 13th Int. Conf. Eur. Energy Market*, pp. 1-5, Jun. 2016.
12. McLoughlin F., Duffy A., Conlon M. Characterising domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: An Irish case study / *Energy and build*, 48, 2012, p. 240-248.
13. Nagbe, K., Cugliari, J., & Jacques, J. Short-term electricity demand forecasting using a functional state space model. / *Energies*, 11(5), 2018, 1120, <https://doi.org/10.3390/en11051120>.
14. A. Paudel, K. Chaudhari, C. Long and H. B. Gooi, "Peer-to-peer energy trading in a prosumer-based community microgrid: theoretic model", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 8, pp. 6087-6097, Aug. 2019.
15. Dörner, D., *Bauplan für eine Seele*. 1. Aufl ed. 1999, Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Verl. 831 S.
16. Pflugradt N., Muntwyler U. Synthesizing residential load profiles using behavior simulation / *Energy Procedia*, 122, 2017. p. 655–660.
17. Pflugradt, N., and B. Platzer. "Behavior based load profile generator for domestic hot water and electricity use." 12th International Conference on Energy Storage (Innstock), Lleida, Spain. 2012.

Надійшла: 02.01.2024

Received: 02.01.2024