

Електронні системи та сигнали

УДК 621.314

Відновлення даних у Micro Grid методом емпіричних ортогональних функцій

Корчака^f М. О., ORCID [0000-0001-5370-7307](https://orcid.org/0000-0001-5370-7307)Клен^s К. С., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

Кафедра промислової електроніки

Факультет електроніки

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua

Київ, Україна

Жуйков^s В. Я., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

Факультет електроніки

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua

Київ, Україна

Анотація—В даній статті наведено результати застосування методу емпіричних ортогональних функцій для відновлення даних в матриці даних про освітленість сонячних панелей за умови їх часткового затінення внаслідок проходження хмари. Аналіз існуючих методів відновлення даних показав доцільність застосування саме методу емпіричних ортогональних функцій, який дозволяє відновлювати дані з необхідною точністю. Як початкові дані розглядаються рівні освітленості частини мікрорайону з встановленими сонячними батареями на дахах. Оскільки метод емпіричних ортогональних функцій працює з матрицями даних, територія мікрорайону була розбита на 400 областей, кожній з яких відповідає комірка матриці – частина цих областей містить давачі освітленості, частина ні; відповідно, в матриці з'являються комірки з відсутніми даними, які підлягають відновленню. Метою дослідження було здійснити відновлення даних про освітленість в тих комірках, які співвідносились з областями мікрорайону, де відсутні давачі освітленості. Для перевірки достовірності результатів відновлення даних було сформовано дві матриці: одну за умови, що відомі виміряні дані в кожній комірці, другу — за реальних умов відсутності частини давачів. Розрахунки виконувались для фіксованої форми хмари, яка затіняла частину мікрорайону, за синусоїдальним законом зміни коефіцієнту прозорості атмосфери та із застосуванням поліному третього ступеня. За вказаних умов дослідження середньоквадратична похибка відновлення даних про освітленість не перевищує 1%.

Бібл. 10, рис. 6.

Ключові слова — *Micro Grid; сонячні панелі; прогнозне керування; відновлення даних; метод на основі емпіричних ортогональних функцій.*

І. ВСТУП

Одним з ключових факторів, які впливають на дотримання енергетичного балансу країни, є впровадження сонячної енергетики [1]. Сьогодні на території України функціонує 93 сонячні електростанції загальною встановленою потужністю 530 МВт, що сягає 1% в загальному балансі електричної енергії країни і вказує на перспективність розвитку цього напрямку [2].

Поряд з масштабними сонячними електростанціями значним потенціалом володіє енергетика локальних ізольованих станцій у Micro Grid [3]. Наприклад, у Німеччині на державному рівні заборонено

будівництво приватних будинків без встановлених сонячних панелей на дахах.

За наявності в Micro Grid сонячних панелей система керування має опрацювати дані із метеорологічних та електричних моніторингових систем для забезпечення роботи системи в режимі ефективного використання накопичувача із забезпеченням відбору максимальної енергії відновлюваних джерел. До таких даних відноситься значення величини освітленості сонячних панелей, яка вимірюється на кожній з панелей. При цьому на ділянках, де сонячні панелі або давачі освітленості відсутні, дані про величину освітленості також відсутні. При проходженні хмари над площиною сонячних панелей частина панелей затіняється, і величина освітленості зменшується.



Враховуючи як відсутність даних про освітленість, так і зменшення її величини, керування Micro Grid на базовому інтервалі та на інтервалі спостереження ускладнюється. Застосування принципу невизначеності Гейзенберга вказує на необхідність прогнозування величини енергії, що може бути отримана від станції на наступному інтервалі спостереження [4-6]. Для реалізації прогнозного керування необхідно прогнозувати зміну освітленості сонячних панелей за умови проходження хмари над їх площиною.

Тому метою статті є адаптація методу на основі використання емпіричних ортогональних функцій для відновлення даних про величину очікуваної освітленості сонячних панелей з метою прогнозного керування системою Micro Grid.

II. МЕТОД НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ЕМПІРИЧНИХ ОРТОГОНАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ

Оскільки площа сонячних електростанцій або населених пунктів зі встановленими сонячними панелями на дахах будинків може сягати до 10^6 м^2 , а площа проекції хмари (наприклад купчастої) в середньому сягає 10^5 м^2 , при розрахунках використовується неперервна модель розподілу освітленості.

Відновлення даних здійснюється методами інтерполяції, регресії, усереднення, але при цьому не враховуються фізичні особливості цих даних. Для врахування цих особливостей використовуються фізико-математичні моделі, в яких дані відновлюються математичними методами після підстановки даних про об'єкт у фізичну модель, як це робиться, наприклад, в методі синтезу метеорологічних даних [7].

В якості вхідних даних для моделі розглядаються дані щодо освітленості сонячних панелей, встановлених на дахах будинків деякого району Micro Grid. При цьому враховується загальна площа району, площа сонячних панелей та площа проекції хмари. При проходженні хмари над площиною сонячних панелей для кожного моменту часу складаються двовимірні масиви – матриці, де в кожену комірку (позиція якої відповідає географічному положенню) записуються дані про освітленість. Це дає змогу використовувати для відновлення даних методи перетворення матриць, наприклад, метод на основі використання емпіричних ортогональних функцій [8], який складається з наступних кроків.

Першим кроком методу є SVD (singular value decomposition) розкладання [9] матриці вхідних даних X_0 , в яку занесені дані про освітленість, а комірки з відсутніми даними заповнені нулями, для розрахунку лівої U та правої V матриць власних векторів, а також матриці D , діагональними елементами якої є власні числа:

$$UDV^T = X_0, \quad (1)$$

де V^T – транспонована права матриця власних векторів.

Для відновлення відсутніх даних розраховуються інтерпольовані значення за допомогою перших N емпіричних ортогональних функцій:

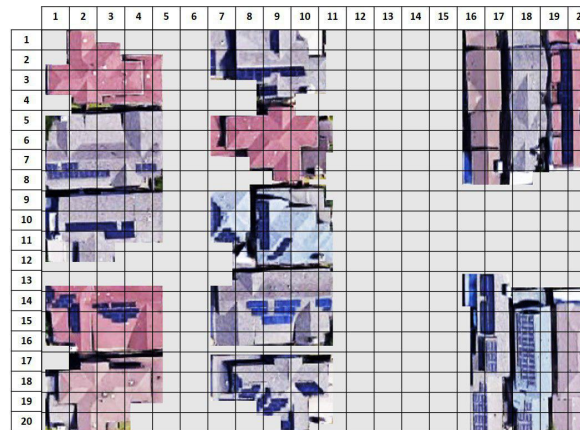


Рис. 1. Зображення частини мікрорайону з супутнику.

$$(X_a)_{ij} = (U_N D_N V_N^T)_{ij} = \sum_{k=1}^N |\lambda_k| |u_k| |v_k^T|, \quad (2)$$

де X_a – матриця з комірками, заповненими відновленими даними; i, j – номер рядка та стовпчика, на перетині яких знаходиться комірка; матриці: U_N – що складається з N перших стовпців матриці U ; V_N^T – що складається з N перших стовпців матриці V^T ; D_N – що складається з N перших стовпців і рядків матриці D ; $|\lambda_k|$ – k -е власне число; $|u_k|$ – k -ий вектор-стовпець матриці U_N ; $|v_k^T|$ – k -ий вектор-стовпець матриці V_N^T .

Заміщення нульових значень матриці X_0 отриманими інтерпольованими значеннями є другим кроком SVD розкладання, в результаті чого отримується матриця X_a з відновленими даними. Оскільки при цьому початкові дані будуть змінені і не відповідатимуть реальним даним, отриманим з давачів, необхідно у відповідних комірках записати початкові відомі значення даних освітленості.

Кроки методу повторюються ітеративно до моменту, коли на n -му етапі ітерації різниця даних, що відновлюються, не стане менше наперед заданого числа Δ :

$$D(n) - D(n-1) < \Delta, \quad (3)$$

де $D(n)$ – дані на n -му етапі ітерації, $D(n-1)$ – дані на $(n-1)$ му етапі ітерації.

На кожному попередньому кроці ітерації як вхідна матриця X_0 використовується матриця X_a , отримана на попередньому етапі ітерації.

III. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДАНИХ

Як об'єкт дослідження обрано мікрорайон міста Боттроп, Німеччина [10]. В цьому районі на більшості дахів будинків встановлено сонячні панелі. На рис. 1 показано зображення частини мікрорайону з супутнику. В якості досліджуваних даних обрано величину

освітленості сонячних панелей за 16 червня 2016 р. за інтервал часу з 4:07 до 20:07.

На рис. 2 схематично зображено модель мікрорайону як матриці розмірністю 20×20 , де червоним кольором зображено комірки, де дані освітленості будуть завжди відомі, а жовтим кольором – комірки, де дані будуть відсутні у зв'язку з відсутністю давачів. Такі матриці отримуються для кожного моменту часу ті. Для спрощення аналізу вважатимемо, що проекція хмари має прямокутну форму і затіняє комірки з 11 по 20 по осям X та Y, як показано на рис. 2.

При моделюванні затінення частини сонячних панелей проекцією хмари вважатимемо, що коефіцієнт прозорості атмосфери змінюється за законом синуса у площині XZ і за рівномірним законом в площині XY. Тоді в місці під вершиною хмари коефіцієнт прозорості буде рівним 0, що відповідає нульовому значенню освітленості, а в місці поблизу краю хмари коефіцієнт прозорості буде рівним 1, що відповідає значенню освітленості за умови відсутності хмари. Графік зміни коефіцієнта прозорості атмосфери в залежності від номеру комірки по осям X та Y зображено на рис. 3. Відновлення даних щодо освітленості сонячних панелей проводиться для перерізу A-A для комірок з 11 по 20, які затінені проекцією хмари.

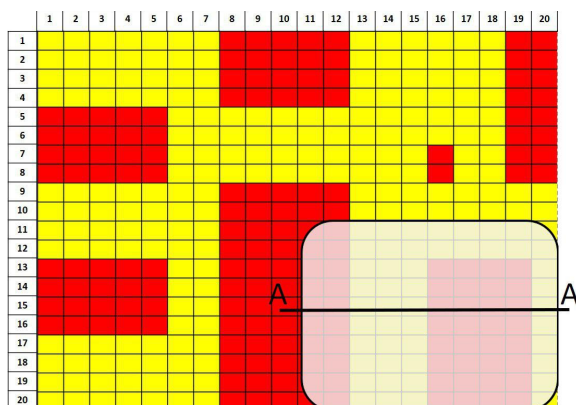


Рис. 2. Схематичне зображення частини мікрорайону як матриці з відомими та відсутніми даними.

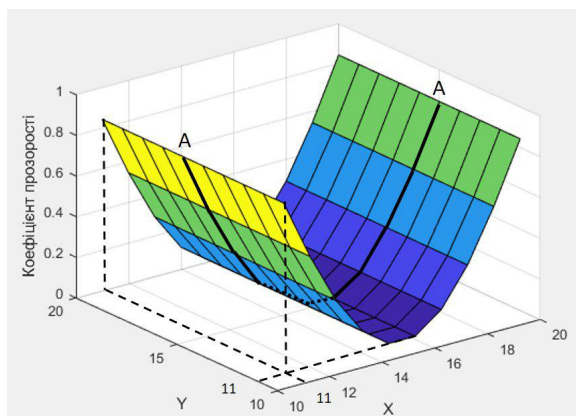


Рис. 3. Графік зміни коефіцієнта прозорості у просторі.

Матриця X_t (рис. 4) містить дані про освітленість за умови, що давачі є в кожній області з 11 по 20 на рис. 1.

Матриця X_0 (рис. 5) відображає варіант, коли дані відсутні внаслідок відсутності давачів в певних областях.

Після застосування методу на основі емпіричних ортогональних функцій матриця з відновленими даними X_a є аналогічною матриці X_t .

На рис. 6 зображено графік зміни освітленості на сонячних панелях для рядка 11 матриці з відновленими даними – результати, отримані при застосуванні методу, повністю співпадають з даними, виміряними давачами.

Перевірка реальності значень, отриманих із застосуванням методу емпіричних ортогональних функцій, здійснювалась шляхом розрахунку середньоквадратичної похибки в системі MATLAB®.

Для розглянутого прикладу для відновлення даних про освітленість сонячних панелей застосований поліном третього ступеня, тому середньоквадратична похибка відновлення складає менше 1%.

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
11	566	531,9	433,6	283	98,28	98,28	283	433,6	531,9	566
12	566	531,9	433,6	283	98,28	98,28	283	433,6	531,9	566
13	566	531,9	433,6	283	98,28	98,28	283	433,6	531,9	566
14	566	531,9	433,6	283	98,28	98,28	283	433,6	531,9	566
15	566	531,9	433,6	283	98,28	98,28	283	433,6	531,9	566
16	566	531,9	433,6	283	98,28	98,28	283	433,6	531,9	566
17	566	531,9	433,6	283	98,28	98,28	283	433,6	531,9	566
18	566	531,9	433,6	283	98,28	98,28	283	433,6	531,9	566
19	566	531,9	433,6	283	98,28	98,28	283	433,6	531,9	566
20	566	531,9	433,6	283	98,28	98,28	283	433,6	531,9	566

Рис. 4. Матриця даних про освітленість за умови, що дані отримуються в кожній комірці.

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
11	566	531,9	0	0	0	0	0	0	0	0
12	566	531,9	0	0	0	0	0	0	0	0
13	566	531,9	0	0	0	98,28	283	433,6	531,9	0
14	566	531,9	0	0	0	98,28	283	433,6	531,9	0
15	566	531,9	0	0	0	98,28	283	433,6	531,9	0
16	566	531,9	0	0	0	98,28	283	433,6	531,9	0
17	566	531,9	0	0	0	98,28	283	433,6	531,9	0
18	566	531,9	0	0	0	98,28	283	433,6	531,9	0
19	566	531,9	0	0	0	98,28	283	433,6	531,9	0
20	566	531,9	0	0	0	98,28	283	433,6	531,9	0

Рис. 5. Матриця з відсутніми даними.

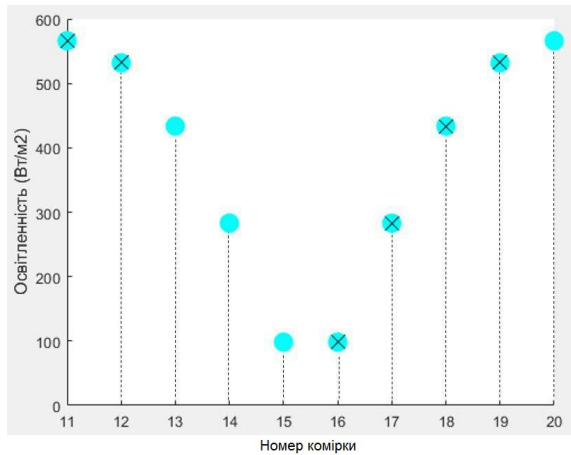


Рис. 6. Результат відновлення даних освітленості: відомі дані (точки O); дані, відновлені методом на основі емпіричних ортогональних функцій (точки ⊗).

ВИСНОВКИ

Таким чином, адаптований метод відновлення даних на основі використання емпіричних ортогональних функцій дозволяє на основі даних про освітленість сонячних панелей за умови проходження над ними хмари відновити дані в місцях, де давачі освітленості відсутні. Для прикладу обрано, що коефіцієнт прозорості атмосфери змінюється за синусоїдальним законом, і для відновлення використовується поліном третього ступеня. В цьому випадку точність відновлення складає 1%.

ВНЕСОК АВТОРІВ

Автором Корчакою М. О. розроблено метод для відновлення даних про величину очікуваної освітленості сонячних панелей.

Автором Клен К. С. запропоновано відновлювати дані про величину очікуваної освітленості сонячних панелей з метою прогнозного керування системою Micro Grid.

Автором Жуйковим В. Я. запропоновано провести аналіз методів відновлення даних у Micro Grid.

Надійшла до редакції 11 травня 2019 р.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] P. P. Havrylko, R. S. Chorni and Y. V. Shevchuk, "Rozvytok ta vprovadzhennia soniachnoi enerhetyky v domohospodarstvakh Ukrainy," *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal*, vol. 2, no. 10, pp. 66-71, 2016. URL: <https://www.inter-nauka.com/uploads/public/14768952997927.pdf>
- [2] K. V. Bogomolova, "Sonyachna energetika: determinanti ta tendencii rozvitku," in *Pershyi krok u nauku: materialy IX studentskoy konferencyi*, Sumy, 2018. URL: http://r250.sudu.edu.ua/bitstream/123456789/66960/1/Bohomolova_Sonyachna_enerhetyka.pdf
- [3] T. Baziuk, I. Blinov, O. Butkevych, I. Honcharenko, S. Denysiuk, V. Zhuikov, O. Kyrlyenko, L. Lukianenko, D. Mykolaiets, K. Osypenko, V. Pavlovskiy, O. Rybina, A. Steliuk, S. Tankevych, and I. Trach., *Intelligent power systems: elements and modes: Under the general editorship of acad. of the NAS of Ukraine O.V. Kyrlyenko*. Kyiv, Ukraine: Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine 2017. ISBN: 978-966-02-7913-1
- [4] K. S. Osypenko; V. Ya. Zhuikov, «Printsyp nevyznachenosti Geizenberga pry otsynsi rivnia energii, shcho generuietsia vidnovliuvanymy dzherelamy [Heisenberg's uncertainty principle in evaluating the renewable sources power level],» *Technical Electrodynamics*, no. 1, pp. 10-16, 2017. DOI: [10.15407/techned2017.01.010](https://doi.org/10.15407/techned2017.01.010)
- [5] B. Ridley, J. Boland, and P. Lauret, "Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors," *Renew. Energy*, vol. 35, pp. 478–483, 2010. DOI: [10.1016/j.renene.2009.07.018](https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.018)
- [6] P. Rowley, P. Leicester, D. Palmer, P. Westacott, C. Candelise, T. Betts, and R. Gottschalg, "Multi-domain analysis of photovoltaic impacts via integrated spatial and probabilistic modelling," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 9, pp. 424-431, 2015. DOI: [10.1049/iet-rpg.2014.0374](https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0374)
- [7] E. Koubli, D. Palmer, P. Rowley and R. Gottschalg, "Inference of missing data in photovoltaic monitoring datasets," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 4, pp. 434-439, 2016. DOI: [10.1049/iet-rpg.2015.0355](https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0355)
- [8] Beckers, J. M. and Rixen, M., EOF calculations and data filling from incomplete oceanographic datasets. *Journal of Atmospheric and oceanic technology*, pp. 1839-1856, 2003. DOI: [10.1175/1520-0426\(2003\)020<1839:ECADFF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<1839:ECADFF>2.0.CO;2)
- [9] Santosh Vempala and Grant Wang. A spectral algorithm for learning mixtures of distributions. *Journal of Computer and System Sciences*, pp. 113–123, 2002. DOI: [10.1109/SFCS.2002.1181888](https://doi.org/10.1109/SFCS.2002.1181888)
- [10] The map of the region URL: <https://goo.gl/maps/WVRdAA73fcFBgRkKk9>

УДК 621.314

Восстановление данных в Micro Grid методом эмпирических ортогональных функций

Корчака^f Н. А., ORCID [0000-0001-5370-7307](https://orcid.org/0000-0001-5370-7307)Клен^s К. С., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

Кафедра промышленной электроники

Факультет электроники

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua

Киев, Украина

Жуйков^s В. Я., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

Факультет электроники

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua

Киев, Украина

Аннотация—В данной статье приведены результаты применения метода эмпирических ортогональных функций для восстановления данных в матрице данных об освещенности солнечных панелей при их частичном затенении в результате прохождения тучи. Анализ существующих методов восстановления данных показал целесообразность применения именно метода эмпирических ортогональных функций, который позволяет восстанавливать данные с требуемой точностью. В качестве исходных данных рассматриваются уровни освещенности части микрорайона с установленными солнечными батареями на крышах. Поскольку метод эмпирических ортогональных функций работает с матрицами данных, территория микрорайона была разбита на 400 областей, каждой из которых соответствует ячейка матрицы – часть этих областей содержит датчики освещенности, часть нет; соответственно, в матрице появляются ячейки с недостающими данными, которые подлежат восстановлению. Целью исследования было осуществить восстановление данных об освещенности в тех ячейках, которые соответствуют областям микрорайона, где отсутствуют датчики освещенности. Для проверки достоверности результатов восстановления данных были сформированы две матрицы: одна при условии, что известны измеренные данные в каждой ячейке, вторая – в реальных условиях отсутствия части датчиков. Расчеты выполнялись для фиксированной формы тучи, которая затеняла часть микрорайона, при синусоидальном законе изменения коэффициента прозрачности атмосферы, с использованием полинома третьей степени. При указанных условиях исследования среднеквадратичная погрешность восстановления данных об освещенности не превышает 1%.

Библ. 10, рис. 6.

Ключевые слова — Micro Grid; солнечные панели; прогнозное управление; восстановление данных; метод на основе эмпирических ортогональных функций.



Filling Gaps in Micro Grid by Method Based on Empirical Orthogonal Functions

M. O. Korchaka^f, ORCID [0000-0001-5370-7307](https://orcid.org/0000-0001-5370-7307)

K. S. Klen^s, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

Power Electronics Department

Faculty of electronics

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" kpi.ua

Kyiv, Ukraine

V. Ya. Zhuikov^s, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

Faculty of electronics

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—An analysis of Micro Grid system performance requires both meteorological and electrical data for the assessment period. However, actual in-field data acquisition is rarely 100%, often resulting in a significant amount of incomplete datasets for performance assessment. These gaps, if not taken into account, may add noticeable bias in yield assessment and thus estimations of the lacking data need to be made. Approaches of back-filling the required data is given and validated here. This paper presents a strategy to back-fill data with good accuracy for both short and long term periods, while taking into account weather as well as system performance variations. Cases of data loss are identified. The first case is that of missing meteorological datasets, while electrical readings are available. This case is met in most small systems, either domestic or commercial, where installers reduce the cost by omitting the meteorological sensors. The second case is that of the electrical monitoring system being interrupted. The third case is a failure of both monitoring sub-systems, which could be due to communication or hardware failures. The last two cases are often met in the majority of solar farms. The application of the Heisenberg uncertainty principle when operating a Micro Grid indicates the need to predict the amount of energy that can be obtained from the station at the next observation interval. For the implementation of predictive control, it is necessary to predict the change in the illumination of solar panels, provided the cloud passes over their plane. Method based on empirical orthogonal functions reconstructs missing data using empirical orthogonal functions, derived from the original data. While EOFs in a complete dataset would typically be calculated using singular value decomposition, the presence of missing data requires an iterative approach. The method allows for the estimation of missing values and full EOFs by first inserting mean values into the missing portions of the dataset and then calculating the EOFs. Because the resulting spatial EOFs and the time series of their magnitudes reconstruct the original data, a truncated version of the original dataset can be generated, using only as many EOFs as are deemed significant through validation. This provides an improved estimate of the missing information over simply inserting mean values, because the small-variance (i.e., noise) EOFs have been removed. The city of Bottrop, Germany, has been selected as the research object. In this area, most roofs have solar panels. The schematic representation of the part of the district with known and missing data, as well as the direction of the projection of the cloud, is given. The data matrix of the illumination is provided, provided that the sensors are installed in such a way that the data are obtained in each cell, the matrix with the data absent due to the absence of sensors and the matrix with the restored data. It is shown that if the coefficient of transparency of the atmosphere is changed according to the sinusoidal law and when the third degree polynomial is used to restore it, the accuracy is no more than 1%.

Ref. 10, fig. 6.

Keywords — *Micro Grid; solar panels; predictive management; filling gaps; method based on empirical orthogonal functions.*

