

Мисюра Євгенія Юрьевна – Кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, Кафедра вищої математики і економіко-математических методів, пр. Науки, 9-А, г. Харків, Україна, 61166; e-mail: misuraeu@mail.ru.

Kovalova Katerina – Lecturer, Candidate of technical science, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, The department of Mathematics High society and economic-mathematical methods, Lenin Avenue, 9av, Kharkov, Ukraine, 61166; e-mail: Kateryna.Kovalova@m.hneu.edu.ua.

Misura Jane – Lecturer, Candidate of technical science, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, The department of Mathematics High society and economic-mathematical methods, Lenin Avenue, 9av, Kharkov, Ukraine, 61166; e-mail: misuraeu@mail.ru.

УДК 621.311.42: 519.23

О. С. МІЛЮТИНА, С. А. ЛЕВЧЕНКО

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ГРАФІКІВ НАВАНТАЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЇ ПІДСТАНЦІ

Приведено обґрунтування та основні аналітичні залежності для статистичного аналізу електричного навантаження трансформаторної підстанції. Розглянуто можливість застосування нормального закону розподілення вірогідностей для визначення прогнозованих комерційних втрат електричної енергії в трансформаторах. Приведено приклад статистичного аналізу електричного навантаження трансформаторної підстанції 110/35/10 кВ. Перевірено гіпотезу про нормальний закон розподілення генеральної сукупності за критерієм Пірсона. Статистичний підхід дозволяє автоматизувати визначення втрат електричної потужності та енергії у часі та оптимізувати режим роботи трансформаторної підстанції.

Ключові слова: трансформаторна підстанція, графік навантаження, статистичний аналіз, нормальний закон розподілення, втрати електричної потужності.

Приведено обоснование и основные аналитические зависимости для статистического анализа электрической нагрузки трансформаторной подстанции. Рассмотрена возможность применения нормального закона распределения вероятностей для определения прогнозируемых коммерческих потерь электрической энергии в трансформаторах. Приведён пример статистического анализа электрической нагрузки трансформаторной подстанции 110/35/10 кВ. Проверено гипотезу о нормальном законе распределения по критерию Пирсона. Статистический подход позволяет автоматизировать определение потерь электрической мощности и энергии во времени и оптимизировать режим работы трансформаторной подстанции.

Ключевые слова: трансформаторная подстанция, график нагрузки, статистический анализ, нормальный закон распределения, потери электрической мощности.

When working on the transformer substation is important to determine active power losses in transformers and power caused by their mode of operation. It is not considered random character of the transformer substation and its projected work. The study is an attempt to discover the law of distribution, which is subject to the said substation work in the presence of load demand. The object of research is the justification of application of statistical analysis to identify the projected losses at the substation. The statistical method allows to describe the over all impact of random factors and the invariability employment transformer substation. According to the central limit theorem amount sufficiently large number of weakly dependent random variables that have roughly the same scale (all values have finite mathematical expectation and variance, none of the cases does not dominate) has distribution close to normal, which is characterized by two integral indicators: expectation $M(X)$ and dispersiyeyu $D(X) = \sigma^2$, where σ – standard deviation.

There is an example of statistic analysis of electrical load transformer substations 110/35/10 kV. Checked hypothesis of normal law on apportionment Pirsons Criteria. Calculations showed that both side LV (10 kV) and MV side (35 kV), the output of the normal distribution load depends on the level of significance α . Statistic approach allows us to avtomatiz determination of the loss of time electrical-power mode and to optimize work of transformer substations.

Keywords: transformer substation, load graph, statistical analysis, normal distribution law, loss of electric power.

Вступ. Графіки навантажень трансформаторів являють собою випадковий, що тече в часі, процес, який формується в результаті спільної дії низки випадкових факторів: загрузки підприємства, замовленнями, наявністю сировини для виробництва продукції, режимом роботи, погодними, кліматичними умовами та ін. За прийнятою практикою, потужність трансформаторів на підстанції вибирається за їхнім навантаженням з урахуванням категорії споживачів за надійністю електропостачання.

При роботі трансформаторів на підстанції важливим є визначення втрат активної потужності в трансформаторах, обумовлених режимом їх роботи.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Для розрахунку втрат активної потужності в трансформаторах використовуються методики [1–4], які дозволяють отримати можливі втрати як активної потужності, так і електричної енергії. В даних джереле-

лах не розглядається випадковий характер роботи трансформаторної підстанції та її прогнозована робота.

В роботах [5, 6] розглядаються втрати електричної потужності і електроенергії в електричних мережах енергосистем.

Інтерес представляє статистичний аналіз роботи повітряних відцентрових компресорів [7], де показано, що навантаження на компресорну станцію може бути описане нормальним законом розподілу.

Мета та задачі дослідження. Нижче приведено аналіз графіків навантаження двотрансформаторної підстанції 110/35/10 кВ потужністю 2х25 МВА, яка живить промислових та сільськогосподарських споживачів.

Метою дослідження є спроба виявити закон розподілення, якому підлягає робота зазначеної підстанції при наявності її графіка навантаження.

© О. С. Мілютіна, С. А. Левченко. 2017

Задачею дослідження є обґрунтування застосування статистичного аналізу для виявлення прогнозованих втрат електроенергії на підстанції.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Визначити півгодинні значення активної потужності добового графіку навантаження на сторонах 10 і 35 кВ.

2. Розрахувати звідні характеристики вибірки значень потужностей.

3. Перевірити гіпотезу про закон розподілення генеральної сукупності за критерієм згідності χ^2 .

Статистичний аналіз роботи підстанції. Статистичний метод дає змогу охарактеризувати сумарний вплив всіх випадкових чинників і їх мінливості на роботу трансформаторної підстанції.

Згідно центральної граничної теоремі сума досить великої кількості слабо залежних випадкових величин, що мають приблизно однакові масштаби (всі величини мають кінцеві математичні очікування та дисперсії; жоден зі случав не домінує), має розподіл, близький до нормального [8, 9], який характеризується двома інтегральними показниками: математичним очікуванням $M(X)$ і дисперсією $D(X) = \sigma^2$, де σ – середнє квадратичне відхилення.

Навантаження підстанції на стороні НН (10 кВ)

Середньозважений добовий графік навантаження на стороні НН (10 кВ) зображено на рис. 1.

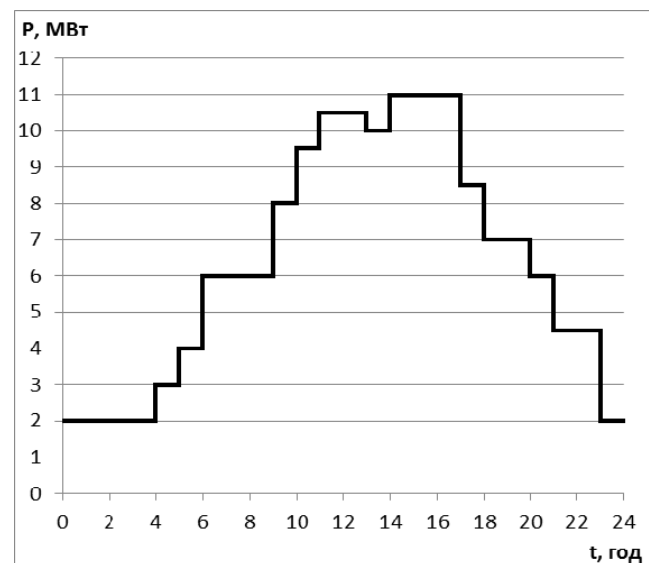


Рис. 1 – Графік навантаження на стороні НН (10 кВ)

Розподілення потужності P кожні півгодини ($\Sigma n_i = 48$) задаємо у вигляді послідовності варіант x_i і відповідних їм частот n_i (табл. 1).

Таблиця 1 – Варіанти та частоти розподілення потужності P (сторона НН)

Варіанта, x_i	2	3	4	4,5	6	7	8	8,5	9,5	10	10,5	11
Частота, n_i	10	2	2	4	8	4	2	2	2	2	4	6

Так як початкові варіанти не є рівновіддаленими, то інтервал, у якому укладені всі варіанти вибірки, поділено на шість рівних, довжини $h=1,5$, часткових інтервалів. Середини часткових інтервалів x_i^* утворюють послідовність рівновіддалених варіант. Як частоти кожної середини інтервалу прийнято суму частот варіант, які потрапили у відповідний частковий інтервал (табл. 2). У цьому випадку зручно знаходити вибіркві середню та дисперсію методом множень за формулами:

$$\bar{x}^* = M_1^* h + C, \quad D_B = \left[M_2^* - (M_1^*)^2 \right] h^2, \quad (1)$$

де h – крок (різниця між двома сусідніми варіантами, $h=1,5$); C – помилковий нуль (варіанта, яка розташована приблизно всередині варіаційного ряду); $M_1^* = (\sum n_i u_i) / n$ – умовний момент першого порядку; $M_2^* = (\sum n_i u_i^2) / n$ – умовний момент другого порядку; $u_i = (x_i - C) / h$ – умовна варіанта.

Таблиця 2 – Рівновіддалені варіанти та частоти розподілення потужності P (сторона НН)

i	x_i^*	n_i	u_i	$n_i \cdot u_i$	$n_i \cdot u_i^2$
1	2,75	12	-2	-24	48
2	4,25	6	-1	-6	6
3	5,75	8	0	0	0
4	7,25	6	1	6	6
5	8,75	4	2	8	16
6	10,25	12	3	36	108
$\Sigma =$	-	48	-	24	184

При обчисленні вибіркової дисперсії для зменшення помилки, викликані угрупуванням, зроблено поправку Шеппарда, а саме, з обчисленої дисперсії віднято $1/12$ квадрата довжини часткового інтервалу h .

Таким чином, з урахуванням поправки Шеппарда дисперсію обчислено за формулою

$$D_B' = D_B - (1/12)h^2. \quad (2)$$

Розрахунки вибіркової середньої, дисперсії та середньоквадратичного відхилення потужності P на стороні НН (10 кВ) наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Вибіркові середня та дисперсія потужності P (сторона НН)

n	h	C	$M1^*$	$M2^*$	\bar{x}_g^*	D_B	D_B'	σ
48	1,5	5,75	0,42	3,83	6,38	8,23	8,05	2,84

Для виключення промахів було застосовано правило 3σ [10], згідно якому випадкова величина виключається, якщо абсолютна величина її відхилення від математичного очікування (вибіркової середньої) переважає потроєне середньоквадратичне відхилення, тобто $x_i^* - \bar{x}_g^* > 3\sigma$.

Перевіримо гіпотезу про нормальне розподілення генеральної сукупності за критерієм Пірсона (критерій χ^2).

Для цього нормується випадкова величина X , тобто переходять до величини $Z = (X - \bar{x}^*) / \sigma$ і обчислюють кінці інтервалів (z_i, z_{i+1}) :

$$z_i = (x_i - \bar{x}^*) / \sigma, z_{i+1} = (x_{i+1} - \bar{x}^*) / \sigma, \quad (3)$$

причому найменше значення Z , тобто z_1 , вважають рівним $-\infty$, а найбільше, тобто z_6 , вважають рівним ∞ (табл.4).

Обчислено теоретичні вірогідності p_i попадання X в інтервали (x_i, x_{i+1}) за рівністю $(\Phi(z) - \text{функція Лапласа})$

$$p_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i) \quad (4)$$

і знайдено теоретичні частоти $n_i' = np_i$ (табл. 5).

Як критерій перевірки нульової гіпотези приймається випадкова величина

$$\chi^2 = \sum (n_i - n_i')^2 / n_i' \quad (5)$$

Ясно, що чим менше різняться емпіричні та теоретичні частоти, тим менше величина критерію (5), і, отже, він до певної міри характеризує близькість емпіричного і теоретичного розподілів.

Для того щоб величина критерію приблизно мала розподіл χ^2 , теоретичні частоти $n_i' = np_i$ не повинні бути дуже малими. Для всіх інтервалів повинно бути виконуватись наступне співвідношення: $n_i' > 5$.

По таблиці критичних точок розподілу χ^2 , за рівнем значущості α і числа ступенів свободи $k = s - 1 - r$, де s – число часткових інтервалів вибірки, r – число параметрів розподілення ($s=6, r=2$) знайдено критичну точку $\chi_{кр}(\alpha; k)$.

$$\chi_{кр}(0,01;3) = 11,3 > 10,773$$

$$\chi_{кр}(0,025;3) = 9,4 < 10,773$$

Якщо $\chi_{набл}^2 < \chi_{кр}^2$ - немає підстав відкинути нульову гіпотезу. Якщо $\chi_{кр}^2 > \chi_{набл}^2$ - нульову гіпотезу відкидають.

Таким чином, висновок про нормальний закон розподілу навантаження на стороні НН (10 кВ) даної підстанції залежить від рівня значущості α .

Навантаження підстанції на стороні СН (35 кВ)

Середньозважений добовий графік навантаження на стороні СН (35 кВ) зображено на рис. 2.

Розподілення потужності P кожні півгодини ($\Sigma n_i = 48$) задаємо у вигляді послідовності варіант x_i і відповідних їм частот n_i (табл. 6).

Наступні розрахунки йдуть тією ж послідовністю, як і для сторони НН. Рівновіддалені варіанти та частоти розподілення потужності P (сторона СН) (табл. 7); вибіркової середня та дисперсія потужності P (сторона СН) (табл. 8); границі інтервалів (сторона СН) (табл. 9); теоретичні вірогідності p_i та теоретичні частоти n_i' (сторона СН) (табл. 10).

Таблиця 4 – Границі інтервалів (сторона НН)

i	Границі інтервалу		$x_i^* - \bar{x}_g^*$	$x_{i+1}^* - \bar{x}_g^*$	Границі інтервалу	
	x_i^*	x_{i+1}^*			$z_i = (x_i^* - \bar{x}_g^*) / \sigma$	$z_{i+1} = (x_{i+1}^* - \bar{x}_g^*) / \sigma$
1	2	3,5	—	-2,875	$-\infty$	-1,014
2	3,5	5	-2,875	-1,375	-1,014	-0,485
3	5	6,5	-1,375	0,125	-0,485	0,044
4	6,5	8	0,125	1,625	0,044	0,573
5	8	9,5	1,625	3,125	0,573	1,102
6	9,5	11	3,125	—	1,102	∞

Таблиця 5 – Теоретичні вірогідності p_i та теоретичні частоти n_i' (сторона НН)

i	$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$	$p_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)$	$n_i' = np_i$	$(n_i - n_i')^2 / n_i'$
1	-0,5	-0,345	0,155	7,460	2,763
2	-0,345	-0,186	0,159	7,609	0,340
3	-0,186	0	0,204	9,775	0,322
4	0	0,217	0,199	9,555	1,322
5	0,217	0,365	0,148	7,107	1,358
6	0,365	0,5	0,135	6,495	4,666
$\Sigma =$			1	48	$\chi^2 = 10,773$

Таблиця 6 – Варіанти та частоти розподілення потужності P (сторона СН)

Варіанта, x_i	6	7	9	9,5	11,5	13,5	15	16	16,5	17	17,5	18
Частота, n_i	10	2	2	4	6	4	4	2	4	2	2	6

Таблиця 7 – Рівновіддалені варіанти та частоти розподілення потужності P (сторона СН)

i	x_i^*	n_i	u_i	$n_i \cdot u_i$	$n_i \cdot u_i^2$
1	7	12	-2	-24	48
2	9	6	-1	-6	6
3	11	6	0	0	0
4	13	4	1	4	4
5	15	8	2	16	32
6	17	12	3	36	108
$\Sigma=$		48		26	198

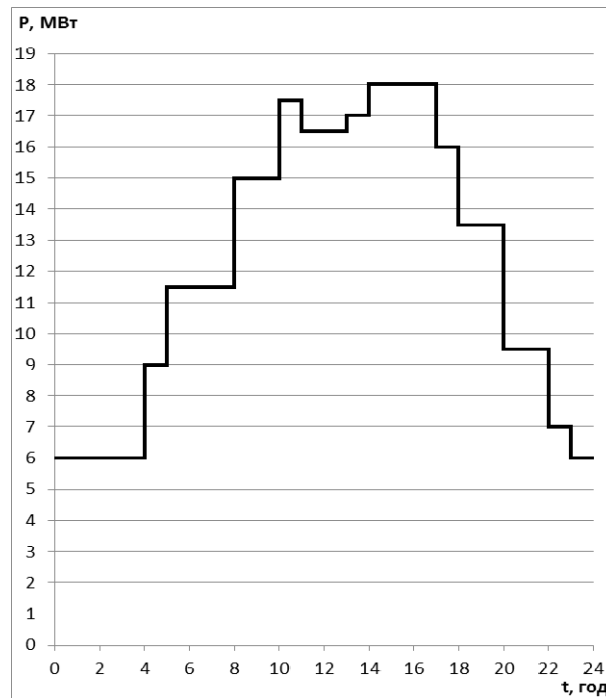


Рис. 2 – Графік навантаження на стороні СН (35 кВ)

Таблиця 8 – Вибіркові середня та дисперсія потужності P (сторона СН)

n	h	C	M1*	M2*	\bar{x}_g^*	D_B	D_B'	σ
48	2	11	0,54	4,13	12,08	15,33	14,99	3,87

Таблиця 9 – Границі інтервалів (сторона СН)

i	Границі інтервалу		$x_i^* - \bar{x}_g^*$	$x_{i+1}^* - \bar{x}_g^*$	Границі інтервалу	
	x_i^*	x_{i+1}^*			$z_i = (x_i^* - \bar{x}_g^*)/\sigma$	$z_{i+1} = (x_{i+1}^* - \bar{x}_g^*)/\sigma$
1	6	8	—	-4,083	$-\infty$	-1,055
2	8	10	-4,083	-2,083	-1,055	-0,538
3	10	12	-2,083	-0,083	-0,538	-0,022
4	12	14	-0,083	1,9167	-0,022	0,495
5	14	16	1,9167	3,9167	0,495	1,012
6	16	18	3,9167	—	1,012	∞

Таблиця 10 – Теоретичні вірогідності p_i та теоретичні частоти n_i' (сторона СН)

i	$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$	$p_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)$	$n_i' = np_i$	$(n_i - n_i')^2 / n_i'$
1	-0,5	-0,354	0,146	6,999079	3,573
2	-0,354	-0,205	0,149	7,174125	0,192
3	-0,205	-0,009	0,196	9,414706	1,239
4	-0,009	0,190	0,198	9,517615	3,199
5	0,190	0,344	0,154	7,411973	0,047
6	0,344	0,5	0,156	7,482501	2,727
$\Sigma=$			1	48	10,977

$$\chi_{кр} (0,01;3) = 11,3 > 10,977$$

$$\chi_{кр} (0,025;3) = 9,4 < 10,977$$

Таким чином, як і на стороні НН (10 кВ), висновок про нормальний закон розподілу навантаження на стороні СН (35 кВ) залежить від рівня значущості α .

Висновки

1. Запропоновано застосування методів математичної статистики для аналізу навантаження трансформаторів підстанцій.

2. Показано, що навантаження на трансформаторну підстанцію може бути як нормально розподіленим, так і близьким до нормального закону розподілення.

3. Для більш детального дослідження роботи підстанції необхідно збільшити число добових спостережень ($\sum n_i > 48$).

4. Застосування середнього навантаження трансформаторів замість статистичного може привести до суттєвих помилок при визначенні прогнозованих комерційних втрат електричної енергії в трансформаторах.

5. Запропонований підхід дозволяє автоматизувати визначення втрат електричної енергії та оптимізувати режим її роботи.

Список літератури:

1. Овчаренко, А. С. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: Проектирование и расчет [Текст] / А. С. Овчаренко, М. Л. Рабинович, В. И. Мозырский, Д. И. Розинский. – К.: Техніка, 1985. – 279 с.
2. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций [Текст]: учебник / Б. Н. Неклепаев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 602 с.
3. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций [Текст]: учебник / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
4. Липкин, Б. Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок [Текст]: учебник / Б. Ю. Липкин. – М.: Высшая школа, 1990. – 366 с.
5. Воротицкий, В. Э. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем [Текст] / В. Э. Воротицкий, Ю. С. Железко, В. Н. Казанцев и др.; под ред. В. Н. Казанцева. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.

6. Левчук, А. П. Аппроксимация графика нагрузки распределительной сети в соответствии с нормальным законом распределения [Текст] / А. П. Левчук // Проблемы общей энергетики. – 2002. – № 7. – С. 57–59.
7. Юрко, И. В. Статистический анализ эксплуатационной нагрузки на центробежный компрессор [Текст] / И. В. Юрко // Вестник Сумского государственного университета. Серия: «Технические науки». – 2012. – № 2. – С. 72–78.
8. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]: учеб. пос. / В. Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.
9. Кремер, Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / Н. Ш. Кремер. – М.: Высшая школа, 2004. – 573 с.
10. Венцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения [Текст] / Е. С. Венцель. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.

Bibliography (transliterated):

1. Ovcharenko, A. S., Rabinovich, M. L., Mozyrskiy, V. I., Rozinskiy, D. I. (1985). Spravochnik po elertrosnabzheniyu promyshlennykh predpriyatiy: proektirovanie i raschet. Kyiv: Technika, 279.
2. Neklepaev, B. N. (1989). Elektricheskaya chast elektrostantsiy. Moscow: Energoatomizdat, 602.
3. Rozhkova, L. D., Kozulin, V. S. (1987). Elektrooborudovanie stantsiy I podstantsiy: uchebnik dlya tekhnikumov. Moscow: Energoatomizdat, 648.
4. Lipkin, B. U. (1990). Elertrosnabzhenie promyshlennykh predpriyatiy i ustanovok: uchebnik dlya uchashchichsya elektrotechn. Moscow: Vysshaja shkola, 366.
5. Vorotnizkiy, V. E., Zhelezko, Y. S., Kazanzev, V. N. et al. (1983). Poteri elektroenergii v elektricheskikh setyakh energosistem. Moscow: Energoatomizdat, 368.
6. Levchuk, A. P. (2002). Aproksimatsiya grafika nagruzki raspredelitelnoy seti v sootvetstvii s normalnym zakonom raspredeleniya. Problemy zagalnoyi energetyky, 7, 57–59.
7. Yurko, I. V. (2012). Statisticheskyy analiz expluatazionnoy nagruzki na tsentrobezhnyy compressor. Vestnik Sumskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: «Tehnicheskie nauki», 2, 72–78.
8. Gmurman, V. E. (2003). Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika. Moscow: Vysshaja shkola, 479.
9. Kremer, N. Sh. (2004). Teoriya veroyatnostey I matematicheskaya statistika. Moscow: Vysshaja shkola, 573.
10. Ventzel, E. S. (2000). Teoriya veroyatnostey i ee inzhenernye prilozheniya. Moscow: Vysshaja shkola, 480.

Надійшла (received) 21.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Статистичний аналіз графіків навантаження трансформаторної підстанції/ О. С. Мільотіна, С. А. Левченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 48–53. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Статистический анализ графиков нагрузки трансформаторной подстанции/ О. С. Мильотина, С. А. Левченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 16(1238). – С. 48–53. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Statistical analysis of load graph of transformer substation/ O. Milyutina, S. Levchenko // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P. 48–53. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мільотіна Ольга Сергіївна – магістрант, Запорізька державна інженерна академія, кафедра «Електротехніка та енергоефективність»; пр. Соборний, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006; e-mail: milola555@gmail.com.

Мильотина Ольга Сергеевна – магістрант, Запорожская государственная инженерная академия, кафедра «Электротехника и энергоэффективность»; пр. Соборный, 226, г. Запорожье, Украина, 69006; e-mail: milola555@gmail.com.

Milyutina Olga – magistrant, Zaporizhzhya State Engineering Academy, Sobornyy, 226, Zaporizhzhya, Ukraine, 69006; tel.: 095 6496514; e-mail: milola555@gmail.com.

Левченко Сергій Андрійович – кандидат технічних наук, Запорізька державна інженерна академія, доцент кафедри «Електротехніка та енергоефективність»; пр. Соборний, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006; mail: levchenko_s@rambler.ru.

Левченко Сергей Андреевич – кандидат технических наук, Запорожская государственная инженерная академия, доцент кафедры «Электротехника и энергоэффективность»; пр. Соборный, 226, г. Запорожье, Украина, 69006; e-mail: levchenko_s@rambler.ru.

Levchenko Sergiy – candidate of technical sciences, associate professor, Zaporizhzhya State Engineering Academy, Sobornyy, 226, Zaporizhzhya, Ukraine, 69006; e-mail: levchenko_s@rambler.ru.

УДК 621.396.4

Н. В. МОСКАЛЕЦ

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИХОДА СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЫБОРОЧНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МАТРИЦЫ

Проводится оценка теоретической предельной разрешающей способности некоторых методов определения направления прихода сигнала, реализованных на основе выборочной корреляционной матрицы. Представлена сравнительная характеристика методов с оценкой достоинств, недостатков и присущих им ограничений. Расчет разрешающей способности методов проведен на основе различных значений параметров сигнально-помеховой обстановки. Полученные результаты имитационного моделирования разрешающей способности методов определения направления прихода сигналов могут быть использованы при выборе эффективного метода в задачах пространственно-временного доступа в соответствии с заданными параметрами сигнально-помеховой обстановки при определенных ограничениях.

Ключевые слова: направление прихода сигнала, корреляционная матрица, пространственно-временной доступ, сверхразрешение, антенная решетка

Проводиться оцінка теоретичної граничної роздільної здатності деяких методів визначення напрямку приходу сигналу, що реалізуються на основі вибіркової кореляційної матриці. Представлена порівняльна характеристика методів з оцінкою переваг, недоліків і властивих їм обмежень. Розрахунок роздільної здатності методів проведено на основі різних значень параметрів сигнально-завадової обстановки. Отримані результати імітаційного моделювання роздільної здатності методів визначення напрямку приходу сигналів можуть бути використані при виборі ефективного методу в задачах просторово-часового доступу відповідно до заданих параметрів сигнально-завадової обстановки при певних обмеженнях.

Ключові слова: напрям приходу сигналу, кореляційна матриця, просторово-часовий доступ, зверхроздільна здатність, антенна решітка

Six methods are considered in the analysis of the methods of angular superresolution of the signals: non-adaptive beamforming (Bartlett), Capon (MVDL), thermal noise (TNA), Borgiotti-Lagunas (B-L), maximal entropy (MEM) and multiple signal classification (MUSIC). The comparative characteristic of the methods with assessing their advantages disadvantages and limitations is given. Theoretical resolution of these methods is assessed in the article. Numerical evaluation of resolution ability of the methods of direction arrival of the signal are obtained based on the simulation of various scenarios of signal-to-noise ratio, taking into account the use of correlated and uncorrelated signals, a different number of antenna elements and the values of the signal / interference + noise ratio. These estimations show the ultimate theoretical accuracy of the methods and the potential for their use in problems of space-time access with set limits. The simulation results confirmed the statistical consistency of these methods of estimation of arrival direction angles of correlated and uncorrelated signals from subscriber stations for the space-time sampling in the output of the linear equidistant antenna array.

The present analysis and research results make it possible to select the most effective method for determining the arrival of signals in accordance with the given parameters of signal-to-noise ratio under restrictions.

Keywords: direction of arrival signal, correlation matrix, space-time access, superresolution, antenna array

Введение. В настоящее время в мире и в Украине существует дефицит использования частотного, временного и кодового ресурсов и остро ощущается необходимость в использовании дополнительных физических ресурсов, реализующих повышение эффективности использования радиочастотного ресурса, повышение пропускной способности каналов связи и увеличения продуктивности работы системы мобильной связи в целом [1–3]. В данном аспекте, перспективным является использование методов пространственно-временного доступа (ПВД) в системах мобильной связи [4].

Основной проблематикой в задачах ПВД с использованием адаптивных антенных решеток (АР) является задача определения направления прихода сигналов от мобильных абонентских станций (АС). Данная задача решается на основе различных методов: пеленгации с использованием равносигнальной зоны, оценок характеристик направленности АР, с релейским разрешением,

со сверхразрешением (СР) и др., обладающих различной степенью эффективности [5, 6].

Проблема определения направления прихода электромагнитной волны имеет как самостоятельное значение (пеленгование источников радиоизлучений), так и является составным компонентом более общих задач радиосвязи, радиолокации, навигации и др. [7]. Методы оценки направления прихода сигналов (DOA – Direction of arrival estimation) лежат в основе многих задач телекоммуникаций. Анализ данных методов с точки зрения их эффективности и реализуемости является в достаточной степени актуальной задачей при решении задач ПВД в системах мобильной связи.

Цель и задачи исследования. В рамках исследуемой проблематики, автором данной работы проводится оценка теоретической предельной разрешающей способности некоторых методов определения

© Н. В. Москалец. 2017