

**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](mailto: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](mailto: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](mailto: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

направления прихода сигнала, реализованных на основе выборочной корреляционной матрицы.

Для решения поставленной цели необходимо выполнение следующих задач:

- аналитическое представление алгоритмов с указанием возможных ограничений;
- разработка сценариев моделирования с учетом различных параметров сигнально-помеховой обстановки;
- численное моделирование разрешающей способности исследуемых алгоритмов на основе различных сценариев сигнально-помеховой обстановки.

**Анализ литературных данных.** При реализации методов корреляционных методов в пространственной области удается определять положение спектральных составляющих (направлений прихода), анализируемых (принимаемых) сигналов от источников радиоизлучения (мобильных станций). В работах Джонсона, Кейпона и др. [8, 9], на основе методов нелинейного спектрального анализа были разработаны алгоритмы определения направления прихода сигналов с использова-

нием выборочной корреляционной матрицы, разнесенных на сколь угодно малое расстояние.

Имеется большое число таких алгоритмов к числу которых относятся [5]:

1) методы, основанные на определении положений локальных максимумов псевдоспектра  $D(\theta)$  на сканирование по пространству: Кейпона, “теплого шума”, Борджоти-Лагунаса;

2) методы, основанные на разложении пространственной корреляционной матрицы  $R$  по собственным векторам  $V_k$  и  $k$  – собственным значениям – метод MUSIC, EV (eigenvector);

3) методы, основанные на разделении сигнального и шумового пространств. К числу таких относятся методы ROOT-MUSIC и ESPRIT, ориентированные на использование линейных эквивалентных AP.

**Материалы и методы исследования.** В табл. 1 представлена обобщенная сравнительная характеристика наиболее популярных корреляционных методов оценки направления прихода сигналов.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика корреляционных методов оценки направления прихода сигналов

№	Метод оценки направления прихода сигналов	Достоинства	Ограничения и недостатки метода
1	2	3	4
1	<p>Классический метод формирования луча (метод Бартлетта или метод задержек – расширение спектрального анализа по Фурье), [10]:</p> $D_F(\theta) = \frac{\vec{a}(\theta)^H R_{xx} \vec{a}(\theta)}{\vec{a}^H(\theta) \vec{a}(\theta)},$ <p><math>\vec{v}(\theta)</math> – вектор отклика AP, т.е. фактически столбцы весовых коэффициентов для всех углов прихода сигналов.</p>	Простая реализация	<p>Метод основан на сканировании лучом AP в пространстве и определении максимума уровня излучения.</p> <p>Низкая разрешающая способность, определяемая шириной основного луча AP и уровней боковых лепестков.</p> <p>Разрешающая способность зависит от ширины основного луча AP и связана с ограничением релейского разрешения.</p> <p>Недостаток может быть смягчен увеличением количества элементов AP.</p> <p>Увеличение соотношения сигнал/шум или увеличение времени наблюдения не изменяют разрешения.</p>
2	<p>Алгоритмы линейного предсказания (алгоритм авторегрессионной модели или метод максимума энтропии (ММЭ)), [11]:</p> $D_{ММЭ}(\theta) = R_{11}^{-1} \left  \vec{a}(\theta)^H R_1^{-1} \right ^2.$ <p>Применимость к анализу временных рядов (временного спектра). Ограничение использования к оценке пространственного спектра линейная эквидистантная решетка с равномерным амплитудным распределением.</p>	Возможность применения в AP с нерегулярной структурой размещения АЭ.	<p>Сложность корректной оценки необходимого порядка авторегрессионной модели – длины фильтра (длины вектора <math>R_{11}^{-1}</math>).</p> <p>При малой длине фильтра спектр получается сглаженным, но с плохим разрешением, а сверхбольшая длина фильтра предсказания, при хорошем разрешении, приводит к сильно флуктуирующему спектру – высоким уровнем боковых лепестков случайного характера.</p>
3	<p>Метод Кейпона (Minimum variance method (MVDL) – метод минимального отклонения или наименьшей вариации (дисперсии)), [9]:</p> $D_c(\theta) = 1 / \left( \vec{a}(\theta)^H R^{-1} \vec{a}(\theta) \right)$	<p>Применим к AP любой конфигурации (одно-, двух-, трехмерным, регулярным и нерегулярным AP)</p> <p>Повышение разрешающей способности в сравнении с методом Фурье.</p>	<p>Необходимость в большом количестве обучающих выборок (вдвое больше, чем число элементов решетки), что увеличивает объем вычислительных операций. Слабая эффективность метода при малых объемах выборки и исходных данных. Невозможность пеленгации сигналов сильно коррелированных источников. Количество элементов AP не накладывает ограничений на разрешающую способность. Разрешающая способность растет неограниченно при увеличении соотношения сигнал/шум и объема выборки.</p>

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
4	<p>Алгоритм теплового шума (Thermal Noise Algorithm (TNA)), [12]:</p> $D_{TNA}(\theta) = 1/(\bar{a}(\theta)^H R^{-2} \bar{a}(\theta)).$ <p>При использовании высоких степеней обратной корреляционной матрицы получаем алгоритм высокого разрешения:</p> $D(\theta) = 1/(\bar{a}(\theta)^H R^{-k} \bar{a}(\theta)), k > 2$	<p>При идеальных условиях (без учета технических характеристик и погрешностей аппаратуры) возрастает разрешающая способность по сравнению с методом Кейпона.</p>	<p>С ростом степени <math>k</math> реальная разрешающая способность остается неизменной, но существенно возрастает вычислительная сложность.</p>
5	<p>Метод Борджотти-Лагунаса, [13]:</p> $D_{БЛ}(\theta) = \frac{D_C}{D_{TNA}} = \frac{\bar{a}(\theta)^H R^{-1} \bar{a}(\theta)}{\bar{a}(\theta)^H R^{-2} \bar{a}(\theta)}.$	<p>Относится к группе алгоритмов на основе оценки параметров теплового шума</p>	<p>Нормировка отношения сигнал/шум на выходе АР мощностью теплового шума</p>
6	<p>Метод MUSIC (Multiple signal classification – метод многосигнальной классификации), [14]:</p> $D_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{\bar{a}(\theta)^H \left( \sum_{k=M+1}^R Q_k \cdot Q_k^H \right) \bar{a}(\theta)},$ <p>где <math>Q_k</math> – собственные векторы корреляционной матрицы <math>R</math>; <math>M</math> – число источников излучения.</p>	<p>Большая разрешающая способность в сравнении с методом Кейпона. Метод эффективен, когда соотношение сигнал/шум и количество элементов АР стремятся к бесконечности. Применим к АР любой конфигурации.</p>	<p>Метод MUSIC является предельным случаем Кейпона при стремящемся к бесконечности отношении сигнал/шум. Необходимость предварительной оценки размерности сигнального и шумового подпространств. Критичен к неопределенностям параметров математической модели и к величине соотношения сигнал/шум, когда источники близкорасположены. Большая вычислительная сложность метода, определяемая вычислением сингулярного разложения ковариационной матрицы выходов элементов АР. Метод не дает результатов для коррелированных источников сигналов. Root-MUSIC позволяет осуществлять пеленгацию когерентных сигналов.</p>

На основе анализа табл. 1 представляет интерес получения оценок разрешающей способности представленных корреляционных методов в зависимости от числа приходящих сигналов с различных направлений, значения отношения сигнал/(помеха+шум) (SNR), корреляции сигналов и их количества, числа элементов антенной решетки.

**Исследование корреляционных методов оценки направления прихода сигналов.** Проведем исследование корреляционных методов оценки направления прихода различного числа сигналов для 4-х, 8-ми, 10-ти и 50-ти элементной эквидистантной линейной антенной решетки на основе имитационного моделирования в пакете математического моделирования MatLab13.x. В основе анализа корреляционных методов рассматривались методы: неадаптивного формирования луча (НФЛ), Кейпона, теплового шума, Борджотти-Лагунаса, максимальной энтропии (ММЭ) и многосигнальной классификации (MUSIC).

Получение оценок разрешающей способности данных методов по предложенной методике основывается на моделировании 5-ти сценариев сигнально-помеховой обстановки при вариации различных параметров. С целью получения адекватных количественных и качественных оценок теоретической предельной точности методов использовались значения параметров близкие к границе устойчивости методов, представленные в табл. 2.

Целью задачи оценки теоретической предельной точности корреляционных методов сигналов является

определение угловых координат источников излучения при наблюдении  $M$ -выборки данных с выходов антенных элементов эквидистантной линейной АР и сравнительный анализ методов по критерию разрешающей способности.

В рамках данного исследования используем ряд допущений:

- известно число оцениваемых сигналов (это позволяет выбрать число обучающих выборок равным оптимальному и тем самым избежать дополнительных потерь).

- число оцениваемых сигналов не превышает числа антенных элементов (в противном случае получаем вырожденные оценки);

- сигналы являются неизвестными детерминированными функциями (что является характерным для систем связи);

- набор из  $N$  любых направляющих векторов является линейно независимым (решетчатое множество АР является однозначным, только в случае если любое множество однозначных направляющих векторов  $N$ , формирующих это решетчатое множество в многообразной области образует линейно независимое множество, при  $N \leq M$ , где  $M$  количество АЭ) [10];

- в полосе обработки в качестве шума используется гауссовый белый шум, некоррелированный во всех пространственных каналах с одинаковой мощностью (дополнительная оценка параметров шума существенно усложняет задачу оценивания направления прихода сигналов).

В случае непринятия в расчет используемых допущений, аналитическая модель оценки вектора АР значительно усложняется в связи с увеличением количества параметров определяющих

априорную информацию о наблюдаемых процессах АР. При этом существенно возрастает вычислительная сложность, что делает модель данных практически нереализуемой.

Таблица 2 – Исходные данные для реализации сценариев моделирования методов оценки направления прихода сигналов

Параметр	Значение							
Сценарий моделирования 1								
Количество анализируемых сигналов	4							
Количество антенных элементов АР	4							
Отношение сигнал/помеха+шум, дБ	0;20							
Фаза сигнала,	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	$\pi$				
Углы прихода сигналов, $\beta$	$-20^\circ$	$-10^\circ$	$0^\circ$	$30^\circ$				
Сценарий моделирования 2								
Количество анализируемых сигналов	4							
Количество антенных элементов АР	4							
Отношение сигнал/помеха+шум, дБ	0;20							
Фаза сигнала,	$\pi/4$							
Углы прихода сигналов, $\beta$	$-20^\circ$	$-10^\circ$	$0^\circ$	$30^\circ$				
Сценарий моделирования 3								
Количество анализируемых сигналов	4							
Количество антенных элементов АР	50							
Отношение сигнал/помеха+шум, дБ	0;20							
Фаза сигнала,	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	$\pi$				
Углы прихода сигналов, $\beta$	$-20^\circ$	$-10^\circ$	$0^\circ$	$30^\circ$				
Сценарий моделирования 4								
Количество анализируемых сигналов	4							
Количество антенных элементов АР	4	10	50	100				
Отношение сигнал/помеха+шум, дБ	0							
Фаза сигнала,	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	$\pi$				
Углы прихода сигналов, $\beta$	$-20^\circ$	$-10^\circ$	$0^\circ$	$30^\circ$				
Сценарий моделирования 5								
Количество анализируемых сигналов	8							
Количество антенных элементов АР	10;50							
Отношение сигнал/помеха+шум, дБ	0							
Фаза сигнала,	$\pi/8$	$\pi/4$	$3\pi/8$	$\pi/2$	$5\pi/8$	$3\pi/4$	$7\pi/8$	$\pi$
Углы прихода сигналов, $\beta$	$-15^\circ$	$-35^\circ$	$-55^\circ$	$-80^\circ$	$15^\circ$	$35^\circ$	$55^\circ$	$80^\circ$

### Результаты моделирования оценок разрешающей способности корреляционных методов.

**Сценарий 1.** Рассматриваются некоррелированные сигналы от 4-х точечных источников излучения с углами прихода:  $-20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 30^\circ$  и фазой:  $\pi/4, \pi/3, \pi/2$  и  $\pi$  (табл. 2). Количество элементов

АР – 10, расстояние между АЭ –  $d = \lambda/2$ . Соотношение сигнал/шум: 0; 20 дБ. Из анализа графиков рис. 1, а следует что неадаптивный метод формирования луча (по Фурье) не дает возможности пространственного разделения сигналов, как можно видеть 3 из 4-х сигналов находятся в одном элементе разрешения.

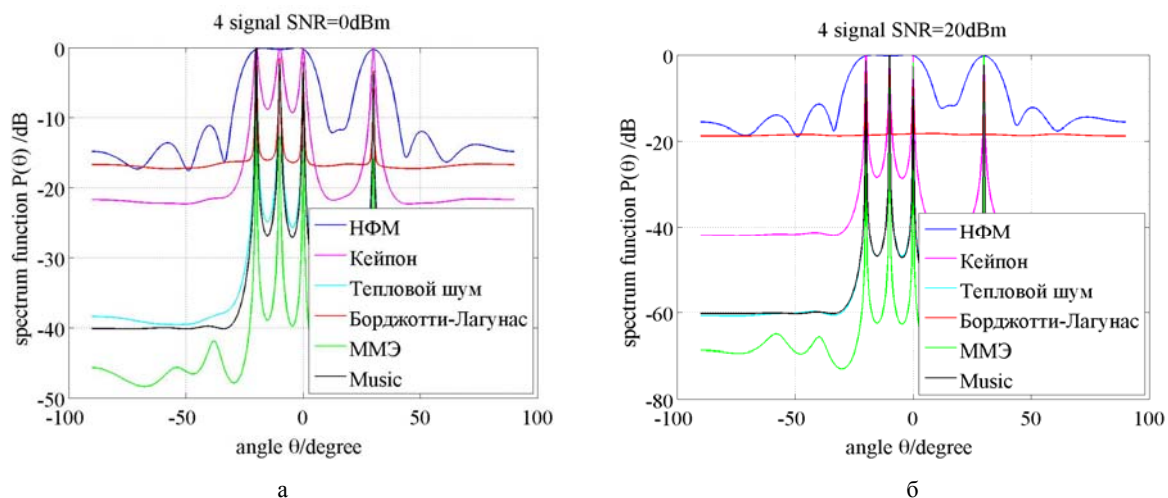


Рис. 1 – Графики зависимости мощности излучения от угла прихода некоррелированных сигналов корреляционных методов: а – SNR= 0 дБ; б – SNR= 20 дБ

Остальные методы обладают более высокими характеристиками разрешения сигналов и позволяют оценивать углы прихода данных сигналов с различной точностью. Как можно видеть наиболее высокоточным методом является метод ММЭ, вместе с тем в спектре присутствуют ложные пики. Из рассматриваемого набора методов, только методы MUSIC и ММЭ обеспечивают получение максимума мощностей прихода сигналов с рассматриваемых направлений. С увеличением  $SNR$  до 20 дБ (рис. 1, б) значительно повышается разрешающая способность методов за ис-

ключением методов Борджотти-Лагунаса и классического НФМ.

2. **Сценарий 2.** Данный сценарий предусматривает прием 4-х коррелированных сигналов с фазой  $\pi/4$ . Как видно из полученных результатов представленных на рис. 2, а, б практически все методы не справляются с задачей оценки пространственного разделения источников излучения при соотношении  $SNR$  0 дБ. С увеличением соотношения  $SNR$  до 20 дБ наилучший результат обеспечивает метод ММЭ.

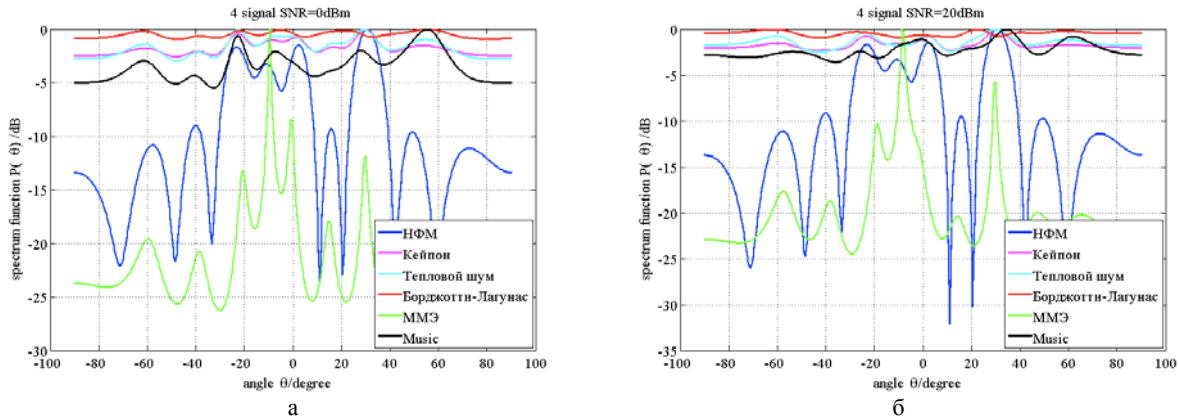


Рис. 2 – Графики зависимости мощности излучения от угла прихода коррелированных сигналов корреляционных методов: а –  $SNR = 0$  дБ; б –  $SNR = 20$  дБ

**Сценарий 3.** Рассмотрим вариант использования АР с количеством элементов 50 (рис. 3, а). Как можно видеть из анализа полученных зависимостей метод ММЭ при оценке пространственного излучения источников дает ложные пики, что в целом ухудшает

его характеристики независимо от соотношения  $SNR$  (рис. 3, б). Наибольшей точностью характеризуются методы MUSIC и Кейпона. Уменьшение и увеличение соотношения  $SNR$  заметно не сказывается на разрешающей способности методов.

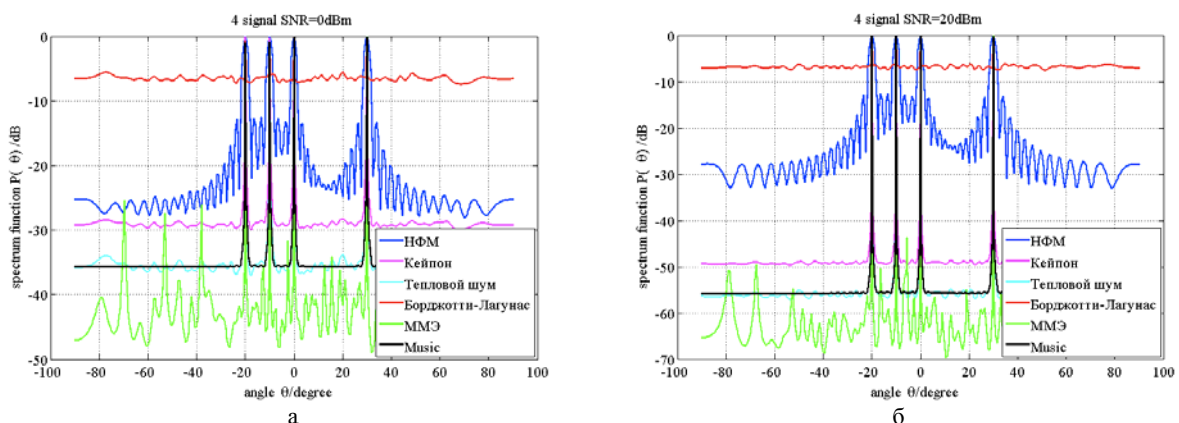


Рис. 3 – Графики зависимости мощности излучения от угла прихода некоррелированных сигналов корреляционных методов использования с количеством элементов АР  $N = 50$  : а –  $SNR = 0$  дБ; б –  $SNR = 20$  дБ

**Сценарий 4.** Проанализируем разрешающую способность корреляционных методов при использовании АР с количеством АЭ: 4;10;50;100 при  $SNR = 0$  дБ (рис. 4, а–е). Характер зависимостей пока-

зывает, что разрешающая способность оценки направления прихода сигналов для каждого из рассматриваемых методов существенно может быть увеличена при увеличении количества АЭ.



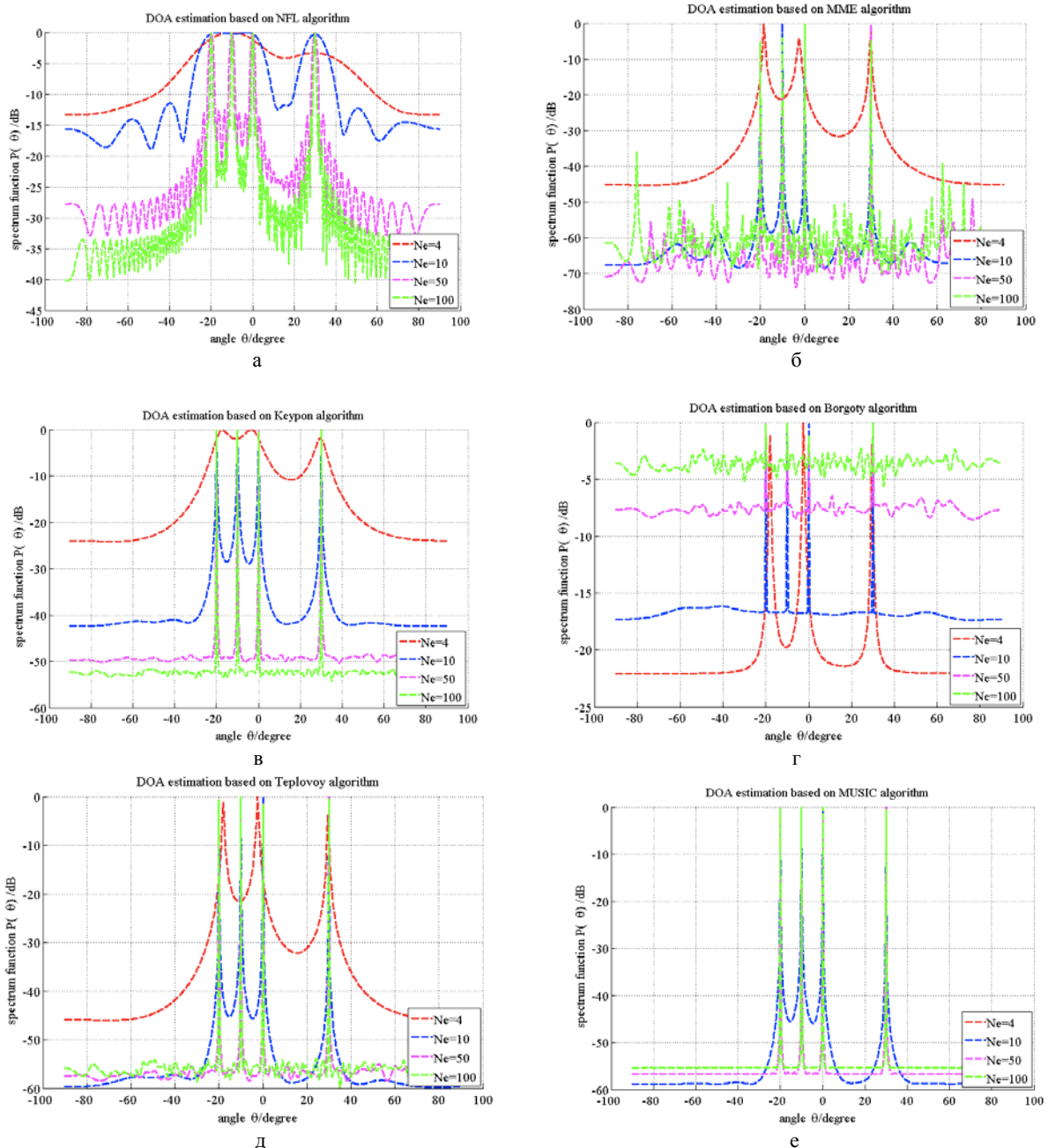


Рис. 4 – Графики зависимости мощности излучения от угла прихода некоорелированных сигналов корреляционных методов с количеством элементов АР а–е:  $N = 4; 10; 50; 100$  и  $SNR = 0$  дБ

5. Сценарий 5. На рис. 5, а–в представлены результаты оценок направления прихода 8-ми сигналов с различными фазами и углами прихода при использовании АР с 10-ю и 50-ю АЭ (табл. 2). Как можно видеть из характера зависимостей представленных на рис. 5, а, б, ключевым параметром влияющим на разрешающую способность является значение соотношения числа оцениваемых сигналов и числа АЭ.

Из анализа зависимостей на рис. 5, а можно видеть, что при количестве антенных элементов равным 10 корреляционная матрица вырождается и ни один из методов не обеспечивает пространственное разделение сигналов, поскольку количество сигналов превышает сумму среднего количества антенных элемен-

тов и ранга корреляционной матрицы ( $N > \frac{N + \text{rank}\{R_{xx}\}}{2}$ ) [12].

Несколько улучшить результат пространственного оценивания прихода сигналов получается путем увеличения числа АЭ до 50 и как можно видеть из рис. 5, б стабильно высокий результат при значениях  $SNR = 0$  дБ дает метод MUSIC.

Стоит отметить, что полученные результаты оценок пространственного разрешения рассматриваемых методов являются потенциально достижимыми в рамках указанных допущений методики анализа.

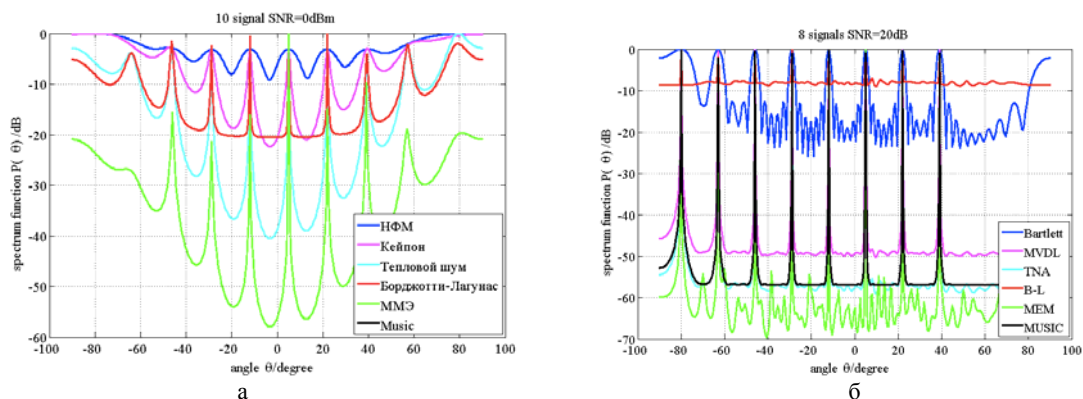


Рис. 5 – Графики зависимости мощности излучения от угла прихода некоррелированных сигналов корреляционных методов при SNR=0 дБ использования с количеством элементов АР: а –  $N = 10$ ; б –  $N = 50$

**Выводы.** Анализ полученных результатов проведенного имитационного моделирования по оценке пространственного разрешения углов прихода сигналов от 4-х источников излучения показал:

1. Классический неадаптивный метод формирования луча является самым простым в реализации на практике, однако имеет существенный недостаток, связанный с ограничением релейского разрешения [9]. Как показывает анализ зависимостей на рис. 4, а данный недостаток может быть смягчен только увеличением количества АЭ. Улучшение соотношения сигнал/шум или увеличение времени наблюдения не изменяют разрешения (рис. 1, а, б).

2. Оценка пространственного разрешения источников по методу Кэйпона превосходит классический метод формирования луча, поскольку он использует каждую доступную степень свободы для концентрации полученной энергии вдоль направления интересующего пеленга. Существующая при этом минимизация мощности может быть интерпретирована как ограничение некоторой способностью подавления шума для более сфокусированного формирования нуля в направлениях присутствия других источников сигнала. При этом уменьшается спектральное рассеивание с близко расположенных источников, хотя разрешающая способность формирования ДН антенны по Кэйпону зависит от соотношения сигнал-шум (рис. 1, а, б) и от апертуры АС (рис. 4, в).

3. Среди непараметрических методов непрерывного анализа: “теплого шума”, Борджотти-Лагунаса метод Кейпона обладает самой низкой разрешающей способностью (рис. 1, а). Вместе с тем, при увеличении числа АЭ, что увеличивает конечную длину выборки, на фоне случайных амплитудно-фазовых ошибок в каналах приема методы Борджотти-Лагунаса и “теплого шума” могут терять свое преимущество над алгоритмом Кейпона (рис. 3, б).

4. Метод многосигнальной классификации MUSIC является предельным случаем метода Кейпона при соотношении сигнал/шум стремящемся к бесконечности, что согласуется с более высокой разрешающей способностью MUSIC по сравнению с алгоритмом Кейпона. Анализируя приведенные графики рис. 1, а, б, приходим к выводу, что метод MUSIC способен обеспечить разрешение независимо от соотношения сигнал-шум, приходящих сигналов при до-

статочном угловом разнесении источников. Вместе с тем из анализа работ [6, 9, 11] известно, что метод MUSIC критичен к неопределенностям параметров математической модели, а также к величине соотношения сигнал/шум в случае, когда источники имеют близкие по значению пеленги. Как видно из графиков, представленных на рис. 2, а, б метод MUSIC предполагает некоррелированность сигналов источников между собой, что в реальных условиях многолучевого излучения далеко не всегда выполнимо. Если достаточно велико значение отношение сигнал-шум и время сбора данных, а модель сигнала достаточно точная, метод MUSIC дает статистически состоятельные оценки, превосходящие оценки других методов рассмотренных в работе (рис. 1, а, б).

5. Результаты имитационного моделирования подтверждают статистическую состоятельность рассматриваемых методов оценивания углов прихода сигналов от абонентских станций. Оценка осуществлялась на основе пространственно-временной выборки на выходе 8-ми элементной линейной эквидистантной антенной решетки, с учетом взаимной корреляции сигналов.

6. В идеальных условиях данные корреляционных методы позволяют получать сколь угодно точные значения направления прихода сигналов. Вместе с тем предполагается, что для успешного решения задачи сверхразрешения требуется более высокое качество приема (отношение сигнал/шум). При этом будут точно известны геометрические и электродинамические параметры АР, точные координаты установки антенных элементов (АЭ) с учетом выполнения условия  $d < \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{\max}}$ , где  $d$  – расстояние между соседними АЭ, параметры самих разрешаемых сигналов.

7. На основании проведенного исследования, становится понятным, что глобально оптимального метода на основе пространственно-временной выборки не существует. Привлекательность тех или иных методов в большей степени зависит от наличия и объема априорной информации об исследуемых процессах, от способа оценки результатов векторов отклика АР и способа её использования применительно к действующей сигнально-помеховой обстановке, конфигурации АР и её геометрических параметров и др.

Кроме того, существуют определенные отрицательные исходы решений – возникновение ложных отметок об обнаружении несуществующих источников излучений, смещения в оценках направления прихода сигналов.

Проведенный сравнительный анализ показал, что проблема использования корреляционных методов в задачах пространственно-временного доступа остается актуальной для исследований, поскольку остаются недостаточно изученными вопросы, связанные с получением объективных оценок предельной точности углов прихода сигналов в зависимости от ряда отдельных параметров действующей сигнально-помеховой обстановки.

Результаты моделирования методов с получением численных оценок разрешающей способности показали, что разрешающая способность данных методов позволяет их использование в задачах пространственно-временного доступа при строго ограниченных условиях.

#### Список литературы:

1. Mobile and wireless communications Enablers for the 2020 Information Society. EU FP7 ICT-317669-METIS [Electronic resource]. – Available at: [https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS\\_project\\_presentation\\_public.pdf](https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_project_presentation_public.pdf)
2. Hardouin, E. 5G: an operator's perspective [Text] / E. Hardouin // Orange Labs. LTE World Summit, 2013. – P. 10.
3. Авдєєнко, К. Л. Ключові принципи спільного доступу до радіочастотного ресурсу на ліцензійній основі (LSA) [Текст] / К. Л. Авдєєнко, І. О. Гепко, В. Ф. Корсак // Зв'язок. – 2016. – № 6. – С. 49–53.
4. Поповский, В. В. Эффективное использование всего физического пространства сигналов в мобильных телекоммуникационных системах [Текст]: тезисы док. / В. В. Поповский, Ю. А. Василенко // Межрегиональный форум МСЭ. Национальная комиссия, осуществляющая государственное регулирование в сфере связи и информатизации (НКРСИ), 2012. – С. 42–45.
5. Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation [Text] / ed.: T. E. Tuncer B. Friedlander. – Academic Press, 2009. – 456 p. doi: [10.1016/c2009-0-19135-3](https://doi.org/10.1016/c2009-0-19135-3)
6. Chandran, S. Advances in Direction-of-Arrival Estimation [Text] / S. Chandran. – Artech House, 2006. – 496 p.
7. New Directions in Wireless Communications Research [Text] / ed.: V. Tarokh. – Springer US, 2009. – 483. doi: [10.1007/978-1-4419-0673-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0673-1)
8. Johnson, R. L. Comparison of Superresolution Algorithms for Radio Direction Finding [Text] / R. L. Johnson, G. E. Miner // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 1986. – Vol. AES-22, № 4. – P. 432–442. doi: [10.1109/taes.1986.310779](https://doi.org/10.1109/taes.1986.310779)
9. Capon, J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis [Text] / J. Capon // Proceedings of the IEEE. – 1969. – Vol. 57, № 8. – P. 1408–1418. doi: [10.1109/proc.1969.7278](https://doi.org/10.1109/proc.1969.7278)
10. Monzingo, R. A. Adaptive antenna arrays: Introduction to the theory [Text] / R. A. Monzingo, T. W. Miller. – Moscow: Radio and Communications, 1986. – 448 p.
11. Nickel, U. Angular superresolution with phased array radar: a review of algorithms and operational constraints [Text] / U. Nickel // IEE Proceedings F Communications, Radar and Signal Processing. – 1987. – Vol. 134, № (1). – P. 53–59. doi: [10.1049/ip-f-1.1987.0010](https://doi.org/10.1049/ip-f-1.1987.0010)
12. Gabriel, W. F. (1980). Spectral analysis and adaptive array super-resolution techniques [Text] / W. F. Gabriel // Proceedings of the IEEE. – Vol. 68, № 6. – P. 654–666. doi: [10.1109/proc.1980.11719](https://doi.org/10.1109/proc.1980.11719)
13. Borgiotti, G. Superresolution of uncorrelated interference sources by using adaptive array techniques [Text] / G. Borgiotti, L. Kaplan // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1979. – Vol. 27 № 6. – P. 842–845. doi: [10.1109/tap.1979.1142176](https://doi.org/10.1109/tap.1979.1142176)
14. Lavate, T. B. Performance Analysis of MUSIC and ESPRIT DOA Estimation Algorithms for Adaptive Array Smart Antenna in Mobile Communication [Text] / T. B. Lavate, V. K. Kokate, A. M. Sapkal // 2010 Second International Conference on Computer and Network Technology, 2010. – P. 308–311. doi: [10.1109/iccnt.2010.45](https://doi.org/10.1109/iccnt.2010.45)

#### Bibliography (transliterated):

1. Mobile and wireless communications Enablers for the 2020 Information Society. EU FP7 ICT-317669-METIS. Available at: [https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS\\_project\\_presentation\\_public.pdf](https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_project_presentation_public.pdf)
2. Hardouin, E. (2013). 5G: an operator's perspective. Orange Labs. LTE World Summit, 10.
3. Avdeenko, K. L., Gepko, I. O., Korsak, V. F. (2016). Klyuchovi printsiipi spilnogo dostupu do radiochastotnogo resursu na litsenziyniy osnovi (LSA). Zv'yazok, 6, 49–53.
4. Popovskij, V. V., Vasilenko, Ju. A. (2012). Jeffektivnoe ispol'zovanie vsego fizicheskogo prostranstva signalov v mobil'nyh telekommunikacionnyh sistemah. Mezhtseional'nyj forum MSJe. Nacional'naja komissija, osushhestvlyajushhaja gosudarstvennoe regulirovanie v sfere svyazi i informatizacii (NKRSI), 42–45.
5. Tuncer T. E., Friedlander B. (ed.) (2009). Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation, Academic Press, 456. doi: [10.1016/c2009-0-19135-3](https://doi.org/10.1016/c2009-0-19135-3)
6. Chandran, S. (2006). Advances in Direction-of-Arrival Estimation. Artech House, 496.
7. Tarokh, V. (ed.) (2009). New Directions in Wireless Communications Research. Springer US, 483. doi: [10.1007/978-1-4419-0673-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0673-1)
8. Johnson, R. L., Miner, G. E. (1986). Comparison of Superresolution Algorithms for Radio Direction Finding. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-22 (4), 432–442. doi: [10.1109/taes.1986.310779](https://doi.org/10.1109/taes.1986.310779)
9. Capon, J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. Proceedings of the IEEE, 57 (8), 1408–1418. doi: [10.1109/proc.1969.7278](https://doi.org/10.1109/proc.1969.7278)
10. Monzingo, R. A., Miller, T. W. (1986). Adaptive antenna arrays: Introduction to the theory. Moscow: Radio and Communications, 448.
11. Nickel, U. (1987). Angular superresolution with phased array radar: a review of algorithms and operational constraints. IEE Proceedings F Communications, Radar and Signal Processing, 134 (1), 53–59. doi: [10.1049/ip-f-1.1987.0010](https://doi.org/10.1049/ip-f-1.1987.0010)
12. Gabriel, W. F. (1980). Spectral analysis and adaptive array super-resolution techniques. Proceedings of the IEEE, 68 (6), 654–666. doi: [10.1109/proc.1980.11719](https://doi.org/10.1109/proc.1980.11719)
13. Borgiotti, G., Kaplan, L. (1979). Superresolution of uncorrelated interference sources by using adaptive array techniques. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 27 (6), 842–845. doi: [10.1109/tap.1979.1142176](https://doi.org/10.1109/tap.1979.1142176)
14. Lavate, T. B., Kokate, V. K., Sapkal, A. M. (2010). Performance Analysis of MUSIC and ESPRIT DOA Estimation Algorithms for Adaptive Array Smart Antenna in Mobile Communication. 2010 Second International Conference on Computer and Network Technology, 308–311. doi: [10.1109/iccnt.2010.45](https://doi.org/10.1109/iccnt.2010.45)

Поступила (received) 06.05.2017

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Порівняльна оцінка методів визначення напрямку приходу сигналів на основі вибіркової кореляційної матриці / М. В. Москалець // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 16(1238). – С.53–61. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.



**Сравнительная оценка методов определения направления прихода сигналов на основе выборочной корреляционной матрицы/ Н. В. Москалец // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.53–61. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Comparative methods of direction of arrival estimation based on a sample correlation matrix/ M. Moskalets // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P. 53–61. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-5459**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Москалец Микола Вадимович** – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інфокомунікаційної інженерії, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна, 61166; е-пошта: [moskalets1@yandex.ua](mailto:moskalets1@yandex.ua).

**Москалец Николай Вадимович** – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры инфокоммуникационной инженерии, пр. Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: [moskalets1@yandex.ua](mailto:moskalets1@yandex.ua).

**Moskalets Mykola** – PhD, Kharkov National University of Radioelectronics, associate professor of the department of infocommunication engineering, ave. Nauky, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166.

УДК 004.942:62-272.6

**О. Л. СТАНОВСЬКИЙ, ВАЛІД ШЕР ХУССАІН, О. Ю. ЛЕБЕДЕВА, Т. П. СТАНОВСЬКА,  
А. В. ТОРОПЕНКО, П. С. ШВЕЦЬ**

## **МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПОЛІМАТЕРІАЛЬНИХ ОБ’ЄКТІВ В САПР ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДА ВІРТУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ**

Полімеріальні об’єкти створюються для отримання синергетичного ефекту від поєднання різних властивостей матеріалів. Це породжує багатопільові задачі оптимізації щодо вибору цих матеріалів та автоматизованого проектування структури та параметрів самих об’єктів. Звичайні методи розв’язання таких задач, – чисельні, аналітичні, – не підходять для складних об’єктів із нелінійними властивостями. Запропоновано метод віртуальних моделей в САПР полімеріальних об’єктів.

**Ключові слова:** полімеріальні об’єкти, САПР, оптимізація структури та параметрів, метод віртуальної моделі.

Полимеріальні об’єкти створюються для отримання синергетичного ефекту від поєднання різних властивостей матеріалів. Це породжує багатопільові задачі оптимізації щодо вибору цих матеріалів та автоматизованого проектування структури та параметрів самих об’єктів. Звичайні методи розв’язання таких задач, – чисельні, аналітичні, – не підходять для складних об’єктів із нелінійними властивостями. Запропоновано метод віртуальних моделей в САПР полімеріальних об’єктів.

**Ключевые слова:** полимеріальні об’єкти, САПР, оптимізація структури та параметрів, метод віртуальної моделі.

Polymaterial objects are created to achieve a synergetic effect from combination of various properties of materials. This creates a multipurpose optimization problem for choosing these materials and computer-aided design of the structure and parameters of the objects. Conventional methods of solving such problems, – numerical, analytical, – not suitable for complex objects with nonlinear properties. The proposed method of virtual models in CAD palmately objects. The aim of this work is to improve the quality of the automated designing of objects of transport, engineering, instrumentation, chemical and food industries, which consist of substantially different properties of the elements, by creating a method of optimizing the structure and parameters of such polymaterial parts and assemblies. To achieve this goal in the work was proposed and solved the following tasks: existing methods of optimization of structure and parameters of multilayer objects in the CAD system is analyzed; method of virtual models for use in optimization of structure and parameters of multilayer objects in the CAD system is improved; testing of the proposed method in the design of rubber products with positive technical and economic effect is performed.

**Keywords:** polymaterial objects, CAD systems, structure and parameters optimization, the virtual model method.

**Вступ.** В сучасній промисловості широко використовуються деталі та вузли, які або складені із різних за властивостями матеріалів, або, навіть із матеріалів, що нелінійно змінюють свої властивості в просторі або часі (анізотропні та такі, що регулюються) [1, 2]. Зрозуміло, що до проектування таких елементів, особливо автоматизованого, пред’являються значно суворіші умови з точки зору використання сучасних методів та адекватності оптимізаційних моделей. Адже досягнення синергетичного ефекту від використання в одній деталі багатьох різних за властивостями матеріалів потребує нових підходів до розв’язання задач оптимізації в САПР, безумовно, оптимізації багатопільової, багатовимірної та багатоекстремальної.

В той же час деякі існуючі методи такої оптимізації не отримали достатнього розвитку, що суттєво звужує можливості виробництва та негативно впливає

на конкурентоспроможність його продукції. Зокрема, в статті йдеться про вдосконалення методу віртуальної моделі для оптимізації полімеріальних виробів.

**Аналітичний огляд.** Існує клас деталей та вузлів машин, приладів, апаратів, тощо, в яких полімеріальність створюється навмисне при проектуванні або отримується мимовільно – як продукт оптимізації за зовсім іншими цільовими функціями виробу в цілому. До першого типу можна віднести електромеханічні фільтри та гумометалеві амортизатори, в яких на етапі проектування закладається максимальна спроможність поглинати ударні хвилі певних частот [3–5], а до другого – «штучний» механічний фільтр, який виникає поза спеціальними розрахунками та діє в транспортному засобі між дорогою та тілом людини [6–8].

© О. Л. Становський, Валід Шер Хуссаїн, О. Ю. Лебедева, Т. П. Становська, А. В. Торопенко, П. С. Швець. 2017