

УДК 621.396.677 (367)

Б.Ф. Бондаренко¹, В.В. Дацик², К.М. Семибаламут³, В.Ю. Тимчук²

¹Міжнародна громадська організація вчених, діячів науки і спеціалістів «Наука», Київ

²Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

³Національний університет оборони України, Київ

ОСОБЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ ЗНАЧНОЇ ТРИВАЛОСТІ І ПОТУЖНОСТІ В РАДІОТЕХНІЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ З АДАПТИВНИМИ АНТЕННИМИ ГРАТКАМИ

На прикладі радіолокаційної станції (РЛС) показано негативний вплив корисного сигналу значної тривалості і потужності на ефективність роботи радіотехнічних інформаційних систем (РТІС) з адаптивними лінійними антенними ґратками (АЛАГ). Показано, що такий вплив проявляється у зміні модулів вагових коефіцієнтів елементів АЛАГ і тим самим у появі невизначеності щодо номінального порогу виявлення. Використавши математичний апарат лінійної алгебри, було синтезовано алгоритм оптимального виявлення сигналів зазначеного класу. Запропоновані підходи до забезпечення належної ефективності РТІС.

Ключові слова: радіотехнічна інформаційна система, адаптивні лінійні антенні ґратки, опрацювання сигналів, виявлення, кореляційна матриця, статистичне моделювання, апріорна невизначеність сигнально-перешкодової обстановки.

Вступ

РТІС є радіотехнічним комплексом, що забезпечує отримання деякої інформації від об'єкта чи про об'єкт і містить електронні прилади і пристрої, обчислювальні засоби і програмне забезпечення [1]. Прикладами РТІС є РЛС, комплекси радіо і радіотехнічного моніторингу (КРМ), лінії зв'язку та ін.

Сигнали значної тривалості – це сигнали, тривалість яких є порівняною з часом оцінювання кореляційної матриці (КМ) вихідних сигналів приймальних каналів АЛАГ.

Сигнал значної потужності – це сигнал, потужність якого на виході приймального каналу АЛАГ є порівняною з потужністю домінуючого перешкодового сигналу (перешкоди), що надійшов на входи приймальних елементів АЛАГ одночасно з корисним сигналом.

Корисний сигнал – це сигнал, який надходить на входи приймальних елементів АЛАГ з вибраного (контрольованого) напрямку. Цей напрямок збігається з кутовим напрямком максимуму антенного променя АЛАГ у площині розміщення приймальних елементів АЛАГ.

Ставлення задачі. Необхідно з'ясувати причини негативного впливу корисних сигналів значної тривалості і потужності на ефективність РТІС з АЛАГ.

За показник ефективності роботи РТІС вибирають або показники якості виявлення корисного сигналу (ймовірності появи помилок 1-го і 2-го роду в РТІС), або втрати у відношенні сигнал / перешкода

(ВСП) на виході АЛАГ [4], які визначаються як відношення вигляду

$$L_c = q_0/q_c, \quad (1)$$

де q_0 – гранично досяжне ВСП на виході АЛАГ без урахування впливу корисного сигналу на ефективність роботи РТІС, а q_c – ВСП на виході АЛАГ з урахуванням впливу корисного сигналу на ефективність роботи АЛАГ (для тієї самої сигнально-перешкодової обстановки у «робочій» зоні РТІС).

Об'єкт і методи досліджень. За об'єкт досліджень вибрано РЛС, тривалість зондуючого сигналу якої є порівняною з часом оцінки КМ перешкодових сигналів на виходах приймальних каналів АЛАГ. Для розв'язання поставленої задачі застосовувалися математичний апарат лінійної алгебри та статистичне моделювання.

Основний матеріал

Розв'язання задачі: синтез оптимальних алгоритмів виявлення. Під час розв'язання поставленої задачі передбачається, що вихідний сигнал N -канальної АЛАГ визначається виразом (тут і надалі жирним шрифтом позначені матриці та вектори)

$$\mathbf{U}_{\text{АЛАГ}} = \mathbf{K}^H \mathbf{Y} = \sum_{i=1}^N k_i \cdot y_i, \quad (2)$$

де \mathbf{K} – вектор-стовпчик вагових коефіцієнтів k_i , H – знак ермітового спряження; \mathbf{Y} – вектор-стовпчик вихідних сигналів y_i приймальних каналів АЛАГ.

Неважко показати, що за зваженого об'єднання вихідних сигналів приймальних каналів АЛАГ відношення сигнал / перешкода $q_{\text{вих}}$ на виході АЛАГ представляється у вигляді

$$q_{\text{вих}} = \frac{(\mathbf{K}^H \mathbf{v}_0)^2 p_{c1}}{\mathbf{K}^H \mathbf{R}_n \mathbf{K}}, \quad (3)$$

де \mathbf{v}_0 – вектор-стовпчик розміру $N \times 1$, що визначає амплітудно-фазовий розподіл (АФР) корисного сигналу на виходах приймальних каналів АЛАГ, при цьому i -й ($i \in \overline{1, N}$) елемент вектора \mathbf{v}_0 для еквідистантної АЛАГ дорівнює $v_{\mu} = \exp(i-1) \cdot \Delta\varphi$ (тут $\Delta\varphi$ – фазовий зсув корисних сигналів у суміжних приймальних елементах АЛАГ: за відстані між ними, що дорівнює половині довжини робочої хвилі РТІС, маємо $\Delta\varphi = \pi \cdot \sin \theta_{np}$, де θ_{np} – кутове положення максимуму антенного променя АЛАГ у площині розміщення приймальних елементів АЛАГ), p_{c1} – потужність корисного сигналу на виході приймального каналу АЛАГ.

Також в (3) позначено: $\mathbf{R}_n = \overline{\mathbf{Y}_n \mathbf{Y}_n^H}$ – кореляційна матриця (КМ) перешкодових сигналів розміру $N \times N$ на виходах приймальних каналів АЛАГ (риска вгорі – знак усереднення за часом), \mathbf{Y}_n – дискретна вибірка N -вимірного вектора-стовпчика перешкодових сигналів на виходах приймальних каналів АЛАГ.

За виконання умови [2]

$$\mathbf{K}_0 = \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{v}_0 \quad (4)$$

вираз (3) приймає максимальне значення, що дорівнює

$$q_0 = p_{c1} \cdot \mathbf{v}_0^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{v}_0. \quad (5)$$

Просторовий фільтр, який забезпечує максимізацію ВСП на своєму виході, прийнято називати оптимальним просторовим фільтром [3]. Розрахунок вагового вектора за формулами, що подібні (4), називатимемо прямим методом розрахунку вектора вагових коефіцієнтів АЛАГ.

За умови узгодження приймальних каналів АЛАГ з корисним сигналом, оптимальний алгоритм виявлення сигналу з початковою випадковою фазою в РТІС з АЛАГ представляється у вигляді

$$z_0 = |U_{\text{АЛАГ}}| = |\mathbf{K}_0^H \cdot \mathbf{Y}| \geq z_{n0} \quad (6)$$

де z_{n0} – номінальний поріг виявлення, який забезпечує задане значення ймовірності появи помилки 2-го роду (для РЛС – хибної тривоги); знак модуля в (6) означає, що з порогом порівнюється об'єднаний вихідний сигнал вагового суматора АЛАГ.

На жаль, за великої тривалості корисного сигналу обчислити КМ перешкодових сигналів на виходах приймальних каналів АЛАГ, в усякому разі без вжиття спеціальних заходів, практично не можливо. Оцінимо наслідки заміни КМ \mathbf{R}_n в формулі (4) на матрицю вихідних сигналів приймальних каналів АЛАГ \mathbf{R}_0 , вважаючи для спрощення, що час оцінювання КМ, по-перше, дорівнює тривалості корисного сигналу та, по-друге, є цілком достатнім для заміни оцінювальної КМ на статистичну. В цьому випадку КМ \mathbf{R}_0 можна представити в вигляді

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{R}_n + \mathbf{R}_c, \quad (7)$$

де \mathbf{R}_c – КМ корисних сигналів на виходах приймальних каналів АЛАГ.

Вважаючи, що сигнали, надійшовши на приймальні елементи АЛАГ, є просторово вузько смуговими [5], можна КМ корисних сигналів в (7) визначити так

$$\mathbf{R}_c = p_{c1} \cdot \mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{v}_0^H. \quad (8)$$

Матрицю вигляду (7) з урахуванням (8) прийнято називати модифікованою матрицею [6].

З урахуванням формули обернення модифікованої матриці [6] матриця \mathbf{R}_0^{-1} представляється наступним чином

$$\mathbf{R}_0^{-1} = \mathbf{R}_n^{-1} - \frac{p_{c1} \cdot \mathbf{R}_n^{-1} \cdot \mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{v}_0^H \cdot \mathbf{R}_n^{-1}}{1 + p_{c1} \cdot \mathbf{v}_0^H \cdot \mathbf{R}_n^{-1} \cdot \mathbf{v}_0}. \quad (9)$$

З (2) з урахуванням (5) випливає, що вагові коефіцієнти за наявності в приймальних каналах АЛАГ корисних сигналів великої тривалості визначаються співвідношенням

$$\mathbf{K}_c = \frac{\mathbf{K}_0}{1 + q_0}, \quad (10)$$

де позначено $\mathbf{K}_c = \mathbf{R}_0^{-1} \cdot \mathbf{v}_0$.

З (1) з урахуванням (10) випливає, що заміна $\mathbf{K}_0 \rightarrow \mathbf{K}_c$ не призводить до зміни алгоритму виявлення, який з урахуванням (6) і (10) виглядатиме так

$$Z_c = |\mathbf{K}_c^H \cdot \mathbf{Y}| \geq z_{nc}, \quad (11)$$

де $z_{nc} = z_{n0} / (1 + q_0)$.

Оскільки алгоритм (11) отриманий з алгоритму (6) через множення обох частин виразу (6) на один і той самий множник $1/(1+q_0)$, то можна стверджувати, що алгоритми виявлення (6) та (11) рівноцінні з точки зору якості виявлення корисного сигналу.

Результати статистичного моделювання алгоритмів виявлення. Правомочність зазначеного вище твердження наочно ілюструється виглядом кривих виявлення для алгоритмів (6) і (11), наведених на рис. 1, – вони, відповідно криві 1 і 2, повністю збігаються.

При розрахунку кривої виявлення 2 за алгоритмом (11), позначеної значком (*), вважалося, що значення граничного ВСП на виході АЛАГ є відомим, тобто розглядався гіпотетичний випадок роботи РТІС. Для розрахунку кривих виявлення 1 і 2 на рис. 1 використовувався вираз для інтегрального закону розподілу Райса [7].

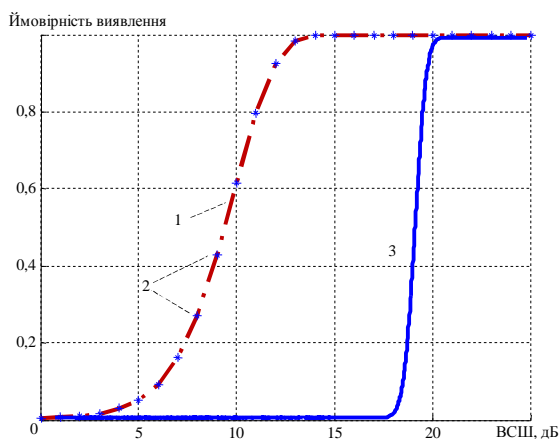


Рис. 1. Криві виявлення для двох оптимальних алгоритмів виявлення сигналів з початковою випадковою фазою

На жаль, сформувавши поріг виявлення через відсутність повної апріорної інформації про параметри корисного сигналу і значення q_0 практично неможливо. Вияснимо, до чого призводить заміна в (11) $z_{nc} \rightarrow z_{no}$. Результат заміни наглядно ілюструється за допомогою кривої виявлення 3 з рис. 1. Значення ймовірності появи помилки 2-го роду при розрахунку кривих виявлення вибрано з умови $P_2 \leq 10^{-4}$. Для РЛС помилка 2-го роду відповідає хибній тривозі, а помилка 1-го роду відповідає пропуску сигналу. Для кривої виявлення, отриманої в результаті реалізації алгоритму (11), збережено цифрове позначення 2, оскільки для обраної, як і попередньої, умов вони, криві, збігаються. Крива виявлення 3 відповідає також алгоритму (11), але при заміні $z_{nc} \rightarrow z_{no}$.

У випадку корисних сигналів великої тривалості і потужності розділити КМ перешкодових і корисних сигналів практично неможливо, принаймні не застосовуючи спеціальні заходи, скеровані на виключення впливу корисного сигналу великої тривалості і потужності на формування вектора вагових коефіцієнтів в АЛАГ. Іншими словами, можна вирахувати лише КМ вихідних сигналів приймальних каналів АЛАГ, яка включає в себе і перешкодові, і корисні сигнали.

Заміна $R_n \rightarrow R_0$ при обчисленні вектора вагових коефіцієнтів, як було показано вище, не призводить до зниження якості виявлення корисного сигналу лише за умови вибору порога виявлення у відповідності з (11). Поява втрат у ВСП при виявленні сигналів в РТІС з АЛАГ і корисним сигналом великої тривалості підтверджується і результатами статистичного моделювання, наведеними на рис. 2 у вигляді графіків залежностей ВСП на виході АЛАГ від номера циклу настройки останньої.

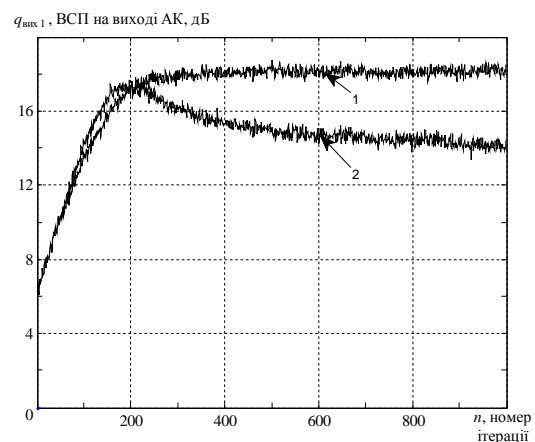


Рис. 2. Залежності відношення сигнал / перешкода на виході АЛАГ від номера циклу настройки для слабкого корисного сигналу

З рис. 2 видно, що для слабких сигналів, тобто для випадку, коли потужність корисного сигналу істотно менше потужності небажаного сигналу на виході приймального каналу АЛАГ, втрати у ВСП на виході АЛАГ порівняно невеликі – не перевищують 3 дБ, проте із збільшенням потужності корисного сигналу втрати можуть досягати десяти і більше децибел, що підтверджується графіками на рис. 3, які відповідають випадку, коли потужність корисного сигналу несуттєво відрізняється від потужності перешкодового сигналу на виході приймального каналу АЛАГ.

На рис. 2 залежність 1 відповідає випадку відсутності негативного впливу корисного сигналу на ефективність роботи АЛАГ, а залежність 2 – випадку наявності подібного впливу. Порівняння графіків, представлених на рис. 2, дозволяє зробити висновок, що наявність корисних сигналів великої тривалості та порівняно невеликої відносної потужності в компенсаційних каналах АК призводить до втрат у ВСП, які дорівнюють 3...4 дБ.

Вихідні дані для рис. 2: $N=5$, ВСП на виході приймального каналу АЛАГ $q_{\text{вих } 1} = -20$ дБ, кількість зовнішніх джерел перешкод – 1, кількість незалежних «випробовувань» під час моделювання вибиралася рівною 500, що дозволяє говорити про достатньо високу достовірність результатів моделювання [8]. Зі збільшенням ВСП на виході приймального каналу АЛАГ втрати у ВСП на виході АЛАГ збільшуються

до десяти і більше децибел, про що свідчать результати статистичного моделювання, які наведені у вигляді графіків на рис. 3 для відношення потужності корисного сигналу до потужності перешкоди на виході приймального каналу АЛАГ, що дорівнює $q_{\text{вих } 1} = -20$ дБ.

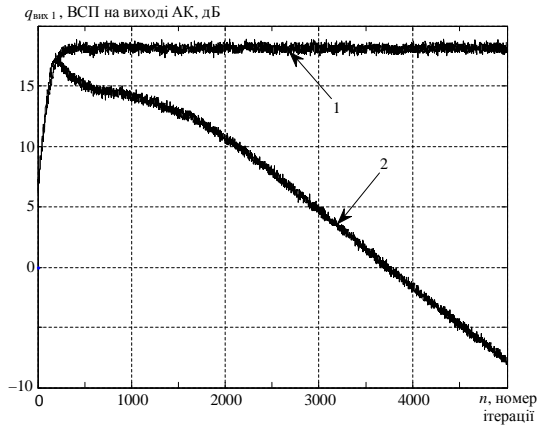


Рис. 3. Залежності відношення сигнал / перешкода на виході АЛАГ від номера циклу настройки для потужного корисного сигналу

На рис. 3 використані ті самі позначення, що і на рис. 2.

З рисунку видно, що втрати у ВСП, які визначаються у відповідності з виразом (1), досягають десяти і більше децибел.

Обґрунтування структури адаптивної лінійної антенної ґратки. Неважко показати, що довільне невироджене перетворення вектора корисних сигналів приймальних каналів АЛАГ не змінює ефективності роботи АЛАГ, якщо вагові коефіцієнти після згаданого матричного перетворення вибираються у відповідності з (4) при заміні, по-перше, АФР корисного сигналу і на виходах приймальних каналів АЛАГ на АФР цього самого сигналу на виходах матричного перетворювача, і, по-друге, замін КМ перешкодових сигналів на виходах приймальних каналів АЛАГ на аналогічну КМ на виходах матричного перетворювача, тому для спрощення математичної моделі АЛАГ при статистичному моделюванні використовувалась АЛАГ з виділеним основним каналом [9].

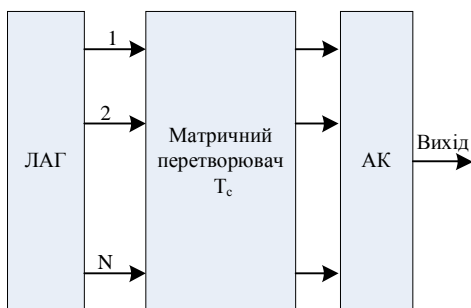


Рис. 4. Структурна схема АЛАГ з матричним перетворювачем і кореляційним автокомпенсатором

Структурна схема АЛАГ, яка використовувалась при моделюванні, показана на рис. 4: АК – кореляційний автокомпенсатор [10], який забезпечує зважене об'єднання вихідних сигналів перетворювача з матрицею T_c . Такий автокомпенсатор має один основний і $(N-1)$ компенсаційних каналів.

Матриця T_c , яка визначає коефіцієнт передачі матричного перетворювача з рис. 4, в блочному вигляді представляється так

$$T_c = \begin{bmatrix} v_o^H \\ A_c \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де A_c – матриця розміру $(N-1) \times N$, отримана з одиничної матриці розміру $N \times N$ шляхом викреслення її першого рядка.

Матричний перетворювач на рис. 4 в принципі є діаграмотворчою матрицею (ДТМ).

ДТМ формує одну гостроспрямовану діаграму напрямленості (ДН) т.зв. компенсаційних каналів АК.

Матриця (12) є невиродженою, тому її включення до складу АЛАГ не змінює потенційних можливостей останньої. Це твердження підтверджується простими теоретичними викладеннями та результатами статистичного моделювання.

Висновки

1. Негативний вплив сигналів великої тривалості і потужності на ефективність РТІС з АЛАГ обумовлено передусім істотним внеском подібного сигналу у формування вагових коефіцієнтів.

2. За використання прямого методу розрахунку вектора вагових коефіцієнтів негативний вплив сигналів розглянутого класу спричинює зменшення модульного значення всіх вагових коефіцієнтів, що не змінює гранично досяжного ВСП на виході АЛАГ, проте призводить до неможливості формування номінального порогу виявлення через відсутність апріорних даних про сигнально-перешкодову обстановку в робочій зоні РТІС і, як наслідок, призводить до суттєвого зниження якості виявлення корисного сигналу в РТІС.

3. Використання в АЛАГ кореляційних автокомпенсаторів як вагових суматорів задля зниження вимог до обчислювального комплексу РТІС призводить до того, що поряд з компенсацією небажаних сигналів відбувається компенсація і корисного сигналу. При цьому міра компенсації корисного сигналу тим вища, чим більше відношення потужності корисного сигналу до потужності домінуючого перешкодового сигналу на виході приймального каналу АЛАГ і чим менше кутове рознесення джерел корисного і домінуючого перешкодового сигналів у площині розміщення приймальних елементів АЛАГ.

4. Негативний вплив сигналів великої тривалості і потужності може звести до нуля всі переваги використання АЛАГ у РТІС будь-якого призначення,

тому існує наполеглива потреба вжити спеціальні заходи стосовно виключення негативного впливу сигналів великої тривалості і потужності на ефективність РТІС з АЛАГ.

Список літератури

1. Большая Советская Энциклопедия. – 1978. – Т. 10.
2. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
3. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
4. Дулевич В.Е. Теоретические основы радиолокации. – М.: Сов. радио, 1964. – 731 с.
5. Кремер И.Я. Пространственно-временная обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.

6. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
7. Заездный А.М. Основы расчетов по статистической радиотехнике. – М.: Связь, 1969. – 447 с.
8. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Курс статистического моделирования. – М.: Наука, 1976. – 560 с.
9. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация: Введ. в теорию. – К.: КВЦ, 2000. – 428 с.
10. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.

Рецензент: д.т.н., с.н.с. А.М. Зубков, Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів.

Особенности обнаружения сигналов большой длительности и мощности в радиотехнических информационных системах с адаптивной антенной решеткой

Б.Ф.Бондаренко, В.В.Дацик, К.М.Семибаламут, В.Ю.Тымчук

На примере радиолокационной станции показано негативное влияние полезного сигнала значительной длительности и мощности на эффективность работы радиотехнических информационных систем с адаптивными линейными антенными решетками. Показано, что такое влияние проявляется в изменении модулей весовых коэффициентов элементов решетки и этим самым в появлении неопределенности относительно номинального порога обнаружения. С использованием математического аппарата линейной алгебры синтезирован алгоритм оптимального обнаружения сигналов указанного класса. Предложены подходы к обеспечению надлежащей эффективности радиотехнической системы.

Ключевые слова: радиотехническая информационная система, адаптивные линейные антенные решетки, обработка сигналов, корреляционная матрица, статистическое моделирование, априорная неопределенность, сигнально-помеховая обстановка.

The detection of long range and high power signals in information radio systems with adaptive antenna array

B. Bondarenko, V. Datsyk, K. Semybalamut, V. Tymchuk

The negative impact of long range and high power signal on efficiency of radar system with adaptive linear antenna array (AA) is shown. It has been proved that mentioned effect causes changes of AA module weights and impossibility of determination of detection threshold. The optimal signal processing algorithm is synthesized.

Keywords: information radio system, radio detection, adaptive antenna array, signal processing, detection, correlation matrix, simulation, interferences.

УДК 621.43.03

В.М. Гераськін¹, А.М. Божок², Д.В. Гераськін³

¹ Факультет військової підготовки Кам'янець-Подільського Національного університету ім. Івана Огієнка, м. Кам'янець-Подільський,

² Подільський Державний аграрно - технічний університет, Кам'янець-Подільський,

³ Факультет військової підготовки Національного авіаційного університету, Київ.

ДВОІМПУЛЬСНИЙ РЕГУЛЯТОР ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ДИЗЕЛЯ ПОЛКОВОЇ ЗЕМЛЕРИЙНОЇ МАШИНИ ПЗМ-2

У статті надано принципову схему та описано роботу двоімпульсного регулятора частоти обертання колінчастого вала дизеля полкової землерийної машини ПЗМ-2 з додатковими регулювальними імпульсами за змінюванням у впускному тракті тиску наддуву і швидкості його змінювання.

Ключові слова: двоімпульсний регулятор, пневматичний чутливий елемент, центральна, периферійна і основна діафрагми, регулювальний дросель, дозатори, впускний тракт, регулювальний імпульс.