

УДК 621.396.662.072.078

Сайко В.Г., д.т.н.; Казіміренко В.Я., к.т.н.;

Грищенко Л. М., здобувач; Кравченко В.І., аспірант

СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ СИТУАЦІЙНО-АДАПТИВНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЗАВАДОНАСИЧЕНОСТІ СИСТЕМИ ШИРОКОСМУГОВОГО БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Saiko V.H., Kazimirenko V.Ya., Hryshchenko L.M., Kravchenko V.I. Stochastic model of situational and adaptive diagnostic of interference saturation for broadband wireless system. Continuous market growth of systems and networks of broadband and wireless communications is conditioned by the increasing number of functions of Communications Operator. The traditional model of access to radio resource of mobile network is based on conventional positioning of subscribers in the network at the time of connection to the strongest radio component. In this system there is not forecast of load distribution created by subscribers. Operator network is working around the clock in mode of full performance of inclusion emitters and receivers in anticipation of anomalous phenomena as drastic changes in the concentration of subscribers served inside cells. This simultaneously results in a complex electromagnetic environment. The paper presents the developed new model of situational and adaptive diagnostic that allows to predict the distribution of the signal / noise ratio in the working zone of the base station and therefore to increase the information capacity of the broadband mobile system and efficiency of its operation.

Keywords: situational and adaptive diagnostic, signal and time situations, interference saturation, hidden Markov model (HMM)

Сайко В.Г., Казіміренко В.Я., Грищенко Л.М., Кравченко В.І. Стохастична модель ситуаційно-адаптивної діагностики завадонасиченості системи широкосмугового бездротового зв'язку. У статті розглянуто розроблену модель ситуаційно-адаптивної діагностики сигнально-завадового стану частотних радіоканалів мережі широкосмугового мобільного зв'язку. На її основі досліджено алгоритм розпізнавання сигнально-часових ситуацій в системі широкосмугового бездротового стільникового зв'язку, що дозволяє проводити ідентифікацію вище зазначених ситуацій в умовах невизначеності позиціонування координат мобільних абонентів.

Ключові слова: ситуаційно-адаптивна діагностика, сигнально-часові ситуації, завадо насиченість, прихована марківська модель (ПММ)

Сайко В.Г., Казимиренко В.Я., Грищенко Л.М., Кравченко В.И. Стохастическая модель ситуативно-адаптивной диагностики помехонасыщенности системы широкополосной беспроводной связи. В статье рассмотрена разработанная модель ситуационно-адаптивной диагностики сигнально-помехового состояния частотных радиоканалов сети широкополосной мобильной связи. На ее основе исследован алгоритм распознавания сигнально-временных ситуаций в системе широкополосной беспроводной сотовой связи, позволяющий проводить идентификацию вышеуказанных ситуаций в условиях неопределенности позиционирования координат мобильных абонентов.

Ключевые слова: ситуационно-адаптивная диагностика, сигнально-временные ситуации, помехонасыщенность, скрытая марковская модель (СММ)

Вступ

Постановка задачі. Постійне зростання ринку систем і мереж широкосмугового бездротового зв'язку обумовлено зростаючою кількістю функцій телекомунікаційного оператора зв'язку. З'являються додатки для бездротових інтелектуальних пристроїв, що вимагають більшої зони покриття, стійкого приймання, більш високих швидкостей передавання даних і повної відсутності блокувань і відмов в обслуговуванні. Тому основний акцент робиться не на перебудову фізичної частини мережі оператора зв'язку, а на логічні компоненти: моделі ефективності управління, системи розподілу частотно-часових і каналних ресурсів мережі, впровадження диференційованого доступу.

© Сайко В.Г., Казіміренко В.Я., Грищенко Л. М., Кравченко В.І., 2017

У широкосмугових системах радіозв'язку доступ до каналів передавання організовується за запитом, що передається передавальною стороною в службовому повідомленні. Тому між станціями, що мають намір отримати канал на передавання, виникає змагання в отриманні часу на передавання. Базова станція (БС), щоб уникнути колізій, встановлює розклад можливих передач. Тривалість інтервалу, протягом якого можливе передавання, залежить від розміру індивідуальної потреби в кількості переданих даних в тому чи іншому вигляді потоку послуг. БС на основі заявок буде формувати розподіл наявних частотних смуг відповідно до затребуваних розмірів байтів на передавання і складатиме розклад на черговість доступу до передавання для обслуговуваних мобільних станцій.

Традиційна модель доступу до радіоресурсу мережі рухомого зв'язку основана на умовному позиціонуванні абонента в мережі в момент підключення за найбільш «сильною» компонентою радіовипромінювання. Тому в такій системі зв'язку відсутній прогноз розподілу сигнального навантаження, створюваного абонентами. Мережа оператора працює цілодобово в режимі повної потужності включення випромінювачів і приймачів в очікуванні аномального явища у вигляді різкої зміни концентрації абонентів всередині стільника, що обслуговується. Це одночасно призводить до складної електромагнітної обстановки.

Запропонована модель ситуаційно-адаптивної діагностики стану частотних радіоканалів дозволяє прогнозувати розподіл рівнів сигнал/шум в робочій смузі роботи БС і відповідно підвищувати інформаційну ємність системи широкосмугового мобільного зв'язку та ефективність її експлуатації.

1. Модель ситуаційно-адаптивної діагностики завадонасиченості вікон прозорості мережі терагерцового діапазону

Нижчезрозглянуто ймовірно-часову модель, що описує характеристики стійкості приймання дискретної інформації, не враховує вид сигналу і алгоритм роботи вирішальних схем приймального пристрою з його обробки. Завдання полягає в тому, щоб на основі випробування даної моделі отримувати можливість розробити раціональні правила оптимізації радіоканалу (оптимального управління параметрами передачі), а не конкретних цифрових пристроїв радіоапаратури. Ймовірно, що така можливість буде забезпечуватися за рахунок багатопараметричного оцінювання ефекту впливу на прийнятий сигнал завад на вході радіоприймального пристрою в умовах реально існуючої статистичної нерівномірності енергетичних характеристик сигналів і завад в робочих інтервалах часу і ділянках частотного діапазону.

Ймовірно, що відповідно до зазначеної постановки питання оцінювання якості радіоприймання буде поширюватися на аналіз не завадостійкості приймання дискретної інформації, а свого роду завадо насиченості приймання. Ці два поняття відрізняються тим, що завадостійкість в обов'язковому порядку передбачає врахування конкретних можливостей радіоапаратури з демодуляції і декодування прийнятих повідомлень і у зв'язку з цим здійснення аналізу на виході пристроїв перетворення та обробки дискретної інформації.

Під завадонасиченістю будемо розуміти виключно наявність у смузі приймання деяких радіозасобів мультиплікативних змін енергетичних і дисперсійних характерних характеристик сигналу, які проявляються на вході радіоприймача, і безпосередній вплив останніх на приймальну інформацію [1,2].

З вище переліченого видно, що в основі забезпечення ситуаційно-адаптивної діагностики повинна лежати ситуаційна модель оцінювання зміни завадонасиченості в зоні розгортання мережі стільникового зв'язку.

На наш погляд, процеси в системі мобільного радіозв'язку зручно подати на основі просторової моделі динаміки змін завадонасиченості, яку можна оцінити за допомогою географічних і демографічних областей обслуговування, з урахуванням таких (зазначених

раніше) факторів, як використання земель, щільності і доходів на душу населення, з тимчасовою і сезонною поведінкою (переміщенням) користувачів (абонентів), які вимагають надання різноманітних послуг зв'язку. За основу стохастичної моделі просторового розподілу величин рівня відносин сигнал/шум взято дискретизацію сумарної завадонасиченості окремої точки, так звані частотні вузли попиту. Однак, базуючись на даній моделі просторового розподілу завадонасиченості, слід уточнити поняття частотного вузла попиту. Надалі під частотним вузлом попиту будемо розуміти деякий район (зону) з більш-менш стаціонарним характером параметрів завадонасиченості. Тобто, поняття точки частотного вузла попиту замінюємо поняттям району частотного вузла попиту, тому що поняття частотної точки попиту вельми умовне і не завжди відображає реальні процеси, що проходять в системі мобільного зв'язку.

В якості математичної моделі завадонасиченості системи мобільного зв'язку зручно взяти систему масового обслуговування і описати її за допомогою математичної моделі, основаної на так званих прихованих марківських послідовностях (моделях) (ПММ) [3]. Математична модель ПММ дозволяє більш точно описати особливості стохастичного характеру зміни інтенсивності завадонасиченості просторової моделі, що оперує категорією частотних вузлів попиту. Підкреслимо, що використання ПММ для ситуаційно-адаптивної діагностики системи мобільного радіозв'язку базується на наступних припущеннях:

1. Територія, що обслуговується системою мобільного стільникового радіозв'язку, розбивається на низку сегментів (станів), всередині яких параметри завадонасиченості кожного типу на порівняно невеликому інтервалі спостереження розглядаються як стаціонарні (або квазістаціонарні). При цьому перехід між станами можна розглядати практично як миттєвий. Центр (або умовний центр) сегмента з точки зору просторової моделі завадонасиченості будемо розглядати в якості частотного вузла попиту.

2. Можна говорити про наближені (неточні) знання географічних координат місця розташування частотних вузлів попиту на топографічній карті, але при цьому відомими можуть бути координати меж частотних вузлів попиту. Географічні координати частотних вузлів попиту можуть змінюватися через переміщення мобільних абонентів, рівень урбанізації сегмента, що обслуговується, тощо.

Розглянемо більш докладно опис стохастичної моделі ситуаційно-адаптивної діагностики завадонасиченості системи широкосмугового мобільного радіозв'язку на основі ПММ.

Нехай деяку територію (місцевість), що обслуговується мережею мобільного зв'язку, можна розбити на підтериторії (області) S_1, S_2, \dots, S_N , що не перетинаються, які можна розглядати як частотні вузли попиту. При цьому кожен частотний вузол попиту S_k ($k = \overline{1, N}$) характеризується випадковим потоком даних про рівень сигнал/завада, що надходять від абонента, який носить яскраво виражений стаціонарний характер для деяких проміжків часу. Стаціонарний потік даних реєструється на приймальному пристрої базової платформи (ППБП) мережі мобільного зв'язку. Слід підкреслити, що послідовність даних, яка реєструється в ППБП, не завжди містить вичерпну (точну) інформацію про місцезнаходження частотних вузлів попиту. Іншими словами, послідовність частотних вузлів попиту, звідки надходять дані, або невідома, або відома лише частково (не в повному обсязі). Далі, відповідно з термінологією ПММ S_1, S_2, \dots, S_N будемо називати також станами моделі, які позначимо через $S = \{S_1, \dots, S_N\}$ - множину станів моделі (N - число станів моделі - частотних вузлів попиту). Слід зазначити, що в кожен дискретний момент часу t_i спостереження за системою дані можуть надходити з будь-якого (довільного) частотного вузла попиту S_k , переходячи при цьому з одного стану до іншого, або залишаючись в цьому стані. Стан моделі в кожен момент часу t_i позначимо через q_i (тобто q_i - дані з частотного

вузла попиту S_k в момент часу t_i). З математичної точки зору повинен бути відомим розподіл ймовірностей вибору початкового стану $\pi = \{\pi_i\}$, тобто $\pi_i = P(q_i = S_i)$ - ймовірність того, що в початковий момент $t = t_1$, будуть надходити дані з вузла S_i ; і відома ймовірність переходу a_{kl} зі стану S_k в стан S_l - умовна ймовірність $a_{kl} = P(q_t = S_l | q_{t-1} = S_k)$. Перехідна ймовірність a_{kl} повинна задовольняти стандартним статистичним умовам, тобто

$$a_{kl} \geq 0, k, l = \overline{1, N}, \sum_{k=1}^N a_{kl} = 1, l = \overline{1, N}.$$

Позначимо у вигляді $A = \{a_{kl}\}$ матрицю перехідних ймовірностей, що має розмірність $N \times N$.

Далі введемо до розгляду множину надаваних даних про значення величин відношення сигнал/шум $V = \{v_1, \dots, v_M\}$, де параметр v_m позначає m -дані, які можуть бути «прив'язані» до адреси (номеру) вхідних даних; M - число надаваних даних. Множину V в ПММ ще називають множиною спостережуваних об'єктів.

Нехай в процесі спостереження за територією, що обслуговується протягом деякого часу, має місце послідовність вхідних даних діагностики сигнально-часового стану частотного радіоканалу $O = \{o_1, \dots, o_n\}$, де o_n - деякий об'єкт (тобто o_n - вхідні дані діагностики частотного радіоканалу v_m); N - довжина послідовності об'єктів, що спостерігаються. З математичної точки зору відома умовна ймовірність $b_l(m) = P(o_t = v_m | q_t = S_l)$ того, що в стані S_l спостерігалися v_m дані абонента. Умовна ймовірність $b_l(m)$ повинна задовольняти умовам:

$$b_l(m) \geq 0, l = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}, \text{ и } \sum_{m=1}^M b_l(m) = 1, l = \overline{1, N}.$$

Сукупність усіх умовних ймовірностей $b_l(m)$ утворює матрицю ймовірностей B появи m -го об'єкта при реалізації l -го стану, що має розмірність $N \times M$.

Відповідно до [3] прихованою Марківською моделлю λ називається тріада параметрів - матриць, тобто A, B, π , тобто, $\lambda = (A, B, \pi)$.

Проілюструємо роботу моделі. Припустимо, що на першому кроці $t = t_1$ надходять дані з області S_1 . Іншими словами, відповідно до розподілу π , вибирається об'єкт $o_1 = v_2$ з ймовірністю $b_1(2) = P(o_1 = v_2 | q_1 = S_1)$. На другому кроці $t = t_2$, надходять дані з області S_3 . Іншими словами, модель переходить в стан $q_2 = S_3$ з ймовірністю $a_{13} = P(q_2 = S_3 | q_1 = S_1)$, в якому вибирається об'єкт $o_2 = v_1$ з ймовірністю $b_3(1) = P(o_1 = v_1 | q_2 = S_3)$. Виконавши, наприклад, $T = 10$ кроків описаного процесу, можна побудувати послідовності $O = \{o_1, o_2, o_3, o_4, o_5, o_6, o_7, o_8, o_9, o_{10}\}$ і $S = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, q_9, q_{10}\}$, які для даного прикладу можуть приймати наступний вигляд:

$$O = \{v_2, v_1, v_1, v_3, v_1, v_2, v_1, v_1, v_3, v_1\} \text{ і } S = \{S_1, S_3, S_3, S_4, S_2, S_1, S_2, S_3, S_4, S_2\}.$$

Відсутність інформації про стан системи пояснює назву - «прихована» модель Маркова, тобто, послідовність станів є як би «прихованою» від ППБП рухомого зв'язку. По суті, ПММ описує поведінку системи у вигляді «чорного ящика», про стан якої можна судити після

виконання деякого спостереження O і наявності апріорних відомостей – ймовірностей A, B, π .

Зробимо ще низку важливих зауважень з приводу розробленої моделі. Поточні процеси в системі мобільного зв'язку не є стаціонарними, тобто в загальному випадку параметри моделі A, B, π залежать від часу. Однак, в системах мобільного зв'язку можна виділити низку характерних ситуацій в поведінці цих систем. При цьому можна говорити також про те, що в часі в цілому ці ситуації мають випадковий характер, що призводить до утруднення процесу управління системою мобільного зв'язку. Тому характер зміни процесів в системі мобільного зв'язку можна описати за допомогою деякої сукупності імовірнісних моделей ПММ. Іншими словами, необхідно ввести до розгляду множину моделей ПММ $\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_r\}$, де λ_i - модель передавання даних діагностики сигнально-часового стану частотного радіоканалу, що враховує конкретну ситуацію в системі зв'язку. Таким чином, розроблена стохастична модель ситуаційно-адаптивної діагностики включає послідовність спостережень O і апріорні відомості Λ про функціонування системи мобільного зв'язку в часі.

2. Алгоритм ідентифікації сигнально-часової ситуації в системах мобільного зв'язку

Підрахунок поточної завадонасиченості мережі можна проводити в поточному (реальному) масштабі часу на основі вхідних даних діагностики сигнально-часового стану частотного радіоканалу. Для визначення величини поточного сигнально-завадового оточення достатньо знати послідовність спостережень $O = \{o_1, \dots, o_T\}$ і множину ситуаційних моделей $\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_r\}$. Однак, складність обчислення прогнозованої завадонасиченості системи обумовлюється, по-перше, невизначеністю вибору моделі ПММ, тому що вона описує безліч ситуацій, що протікають в системі процесів, по-друге, обмеженим числом спостережень $O = \{o_1, \dots, o_T\}$ за умови неповної інформації про місцезнаходження абонентів (невизначеності станів). Іншими словами, при заздалегідь відомому векторі O , елементи вектора Q невідомі, або відомі лише частково. Отже, важливим початковим етапом управління системою мобільного зв'язку є розробка алгоритму ідентифікації ситуації і вибір моделі ПММ, яка найбільш адекватно описує процеси, що протікають в системі.

Так як процеси, що протікають в системі мобільного зв'язку (в тому числі і час виникнення тієї чи іншої ситуації), носять випадковий характер, введемо до розгляду метрику $P(O|\lambda_j)$ - ймовірність того, що для заданої моделі λ_j ($j = \overline{1, r}$) має місце послідовність об'єктів $O = \{o_1, \dots, o_T\}$, що спостерігається. Будемо також вважати, що ситуації в системі є «дискретними» між собою, тобто моменти часу їх появи не перетинаються. Також «дискретність» говорить про відсутність «накладення» і «плавного» переходу ситуацій від однієї до іншої. Звідси неважко побачити, що алгоритм ідентифікації сигнально-часової ситуації в системі мобільного зв'язку може полягати у визначенні максимальної величини умовної ймовірності $P(O|\lambda_j)$. Інакше кажучи, номер поточної сигнально-часової ситуації j в системі мобільного зв'язку можна визначити за формулою

$$j = \arg \max_{1 \leq j \leq r} (P(O|\lambda_j)) \quad (1)$$

Тоді математична задача розпізнання сигнально-часової ситуації полягає в наступному: на основі відомої послідовності спостережень $O = \{o_1, \dots, o_T\}$ і множини ситуаційних моделей $\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_r\}$ необхідно розробити алгоритм визначення номера j поточної сигнально-

часової ситуації в системі мобільного зв'язку за максимумом апостеріорної ймовірності $P(O|\lambda_j)$ згідно з формулою (1).

Алгоритм обчислення ймовірності $P(O|\lambda_j)$ можна вирішити, використовуючи формулу повної ймовірності [4]. Найбільш простий (з точки зору елементарної теорії ймовірності) спосіб обчислення $P(O|\lambda_j)$ - це перерахування всіх послідовностей станів заданої довжини T . Так для будь-якої фіксованої послідовності станів $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_T\}$ (кожен стан q_i послідовності може приймати одне із S_k значень, де $k = \overline{1, N}$) ймовірність її появи для моделі λ_j дорівнює:

$$P(Q|\lambda_j) = \pi_{q_1} a_{q_1 q_2} a_{q_2 q_3} \dots a_{q_{T-1} q_T}, \quad (2)$$

де π_{q_1} - ймовірність стану системи в початковий момент спостережень;

$a_{q_{i-1} q_i}$ - перехідна ймовірність зі стану в стан.

Ймовірність появи заданої послідовності спостережень $O = \{o_1, \dots, o_T\}$ для фіксованої послідовності станів $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_T\}$ дорівнює

$$P(O|Q, \lambda_j) = b_{q_1}(o_1) b_{q_2}(o_2) \dots b_{q_T}(o_T) \quad (3)$$

де $b_{q_i}(o_i)$ - ймовірність того, що в стані q_i спостерігалось передавання даних абонента діагностики стану частотного радіоканалу o_i . Оскільки для марківських моделей виникнення деякої конкретної послідовності станів і поява послідовності спостережень є незалежними подіями, то шукана ймовірність $P(O|\lambda_j)$ буде обчислюватися за формулою

$$P(O|\lambda_j) = \sum_Q P(O|Q, \lambda_j) P(Q|\lambda_j) = \sum_Q \pi_{q_1} b_{q_1}(o_1) a_{q_1 q_2} b_{q_2}(o_2) a_{q_2 q_3} \dots a_{q_{T-1} q_T} b_{q_T}(o_T), \quad (4)$$

де знак Q означає, що підсумовування проводиться за всіма обчислювальними комбінаціями послідовності станів спостереження. З виразу (4) видно, що для самого найгіршого випадку, коли невідомі всі стани в послідовності спостереження $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_T\}$, при прямому підрахунку $P(O|\lambda_j)$ потрібно виконати $2T$ множень для кожної N^T послідовності станів $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_T\}$, разом $2TN^T$ множень. Відзначимо, що навіть для невеликих чисел $N = 10$ (число станів) і $T = 5$ (довжина послідовності) число множень складає близько 10^6 . Ясно, що для практичної реалізації алгоритму ідентифікації сигнально-часової ситуації в ППБП мобільного зв'язку потрібні більш ефективні алгоритми. Такі швидкодіючі алгоритми існують і називаються алгоритмами прямого і зворотного ходу [5].

Висновки

Таким чином, розроблено інноваційну модель ситуаційно-адаптивної діагностики, яка дозволяє прогнозувати розподіл сигнал/шум в робочій смузі роботи базової станції і відповідно підвищити інформаційну ємність системи широкосмугового мобільного зв'язку та ефективність її експлуатації.

Список використаної літератури

1. Сайко В.Г. Метод визначення оптимальних параметрів вікон прозорості в терагерцовому діапазоні / Сайко В. Р., Лисенко Д.О., Грищенко Л. М., Дакова Л.В., Кравченко В. І. // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2017. – № 1(54). – с. 10-16.
2. Сайко В.Г. Алгоритм адаптації радіосистеми до середньостатистичних змін параметрів радіоканалу терагерцового діапазону / Сайко В. Р., Лисенко Д.О., Грищенко Л. М., Дакова Л.В., Кравченко В. І. // Наукові записки УНДІЗ. – 2017. – № 1. – с. 12-18.
3. Рабинер Л.Р. Скрытые марковские модели и их применение в избранных приложениях при распознавании речи // ТИЭР, т. 77, № 2, февраль 1989.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 1998. – 576 с.
5. Huang X.D. Hidden markov models for speech recognition. EdinburghUniversityPress, 1990. - 275 p.

Автори статті

Сайко Володимир Григорович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +38 044 249 25 04. E-mail: vgsaiko@gmail.com.

Казіміренко Валерій Якович – кандидат технічних наук, доцент кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +38 067 409 71 83. E-mail: vkazim2@gmail.com

Грищенко Людмила Миколаївна – науковий співробітник кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +38 093 672 65 40. E-mail: mila_1956@mail.ru

Кравченко Владислав Ігорович – кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +38 063 801 81 16. E-mail: vladislav_kravchenko@mail.ua

Authors of the article

Saiko Volodymyr Hryhorovych – doctor of sciences (technical), professor, head of mobile and video informative technologies department, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +38 044 249 25 04. E-mail: vgsaiko@gmail.com

Kazimirenko Valerii Yakovych - candidate of sciences (technical), associate professor of mobile and video informative technologies department, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. + 38 067 409 71 83. E-mail: vkazim2@gmail.com

Hryshchenko Liudmyla Mykolaivna – research assistant of mobile and video informative technologies department, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +38 093 672 65 40. E-mail: mila_1956@mail.ru

Kravchenko Vladyslav Ihorovych – postgraduate student of mobile and video informative technologies department, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +38 063 801 81 16. E-mail: vladislav_kravchenko@mail.ua

Дата надходження в редакцію: 11.04.2017 р.

Рецензент: д.т.н., проф. М.М. Климаш