

В.В. Клименко¹, О.В. Сухін¹, Д.О. Котов¹, О.В. Сердюк²

¹Військова академія, Одеса

²Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ТА ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ФАКТОРІВ В ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРОВАНІЙ СИСТЕМІ БЕЗПІЛОТНОГО АВТОМОБІЛЯ

В статті наведено аналіз джерел та причин виникнення дестабілізуючих факторів, які маючи випадковий характер, породжують структурну і параметричну невизначеність під час оцінювання внутрішнього стану безпілотного (роботизованого) автомобіля та зовнішнього середовища його функціонування. Поряд з цим представлено оцінку характеру впливу дестабілізуючих факторів на інформаційні можливості інформаційно-керованої системи безпілотного (роботизованого) автомобіля, при цьому акцент в дослідженні зроблено на аналіз погрешностей, які вносять датчики у процес перетворення вхідної фізичної величини у вихідний сигнал.

Ключові слова: безпілотний автомобіль, інформаційно-керуюча система, різносенсорні незалежні датчики, дестабілізуючі фактори, апіорна невизначеність, надлишковість системи, інформаційний канал.

Вступ

Постановка проблеми. Проблема якісного функціонування безпілотного (роботизованого) автомобіля, що експлуатується в межах системи "автомобіль – середовище експлуатації з об'єктами" характеризується невизначеністю та конфліктністю умов його експлуатації [1–3].

Невизначеність та конфліктність середовища експлуатації в значній мірі залежить від інтенсивності інформаційної взаємодії між автомобілем, як об'єктом роботизації, та об'єктами середовища його експлуатації, а також безпосередньо від характеру самої інформації (різносенсорності системи датчиків), що циркулює в інформаційно-керованих системах (ІКС) безпілотних автомобілів (БА).

Сучасні підходи до оцінки якості інформаційних потоків, що циркулюють в ІКС БА базуються на методах обробки цифрової інформації. Саме оцифрування, як процес обробки вхідної інформації, а також її різносенсорний характер породжують структурну і параметричну невизначеність під час оцінювання внутрішнього стану БА та зовнішнього середовища його функціонування.

Тому аналіз джерел та розуміння причин виникнення дестабілізуючих факторів в ІКС БА залишається актуальною задачею.

Рішення проблеми якісного функціонування БА в умовах які характеризуються невизначеністю та конфліктністю, в інформаційному сенсі, можливе шляхом використання прямих та зворотних методів обробки різносенсорної інформації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В роботі [4] розглядається предметна область

(domain), як деяка сукупність реальних об'єктів взаємодії та зв'язків між ними. Як відомо [5], в межах своєї діяльності кожен об'єкт володіє повним набором властивостей, званих атрибутами системи. В контексті досліджуваного завдання предметна область властивостей БА з ІКС, в конфліктних та невизначених умовах експлуатації, найкраще описується двома моделями [6], зокрема:

– варіант фізичної моделі, який відображує матеріальні атрибути наземного адаптивного робототехнічного комплексу за допомогою компонент підсистем узагальненої конструкції з вимірювальною системою датчиків отримання інформації та системою адаптивного управління, а також матеріалізовані елементи середовища технологічної взаємодії у вигляді різносенсорних каналів приймання і обробки сигналів та різноманітних джерел електромагнітних випромінювань;

– варіант аналітичної моделі, що відображує систему формалізації процесів інформаційної взаємодії об'єкта з середовищем експлуатації з об'єктами, яка представлена упорядкованою множиною (вектором) вихідних даних, логічними і аналітичними виразами, алгоритмами або правилами їх побудови.

В кожному варіанті реалізації вказаних вище моделей критичним стає проблема точності опису (формалізації) та врахування різного роду дестабілізуючих факторів, які неминуче присутні в ІКС БА [7–9].

Дестабілізуючі фактори, визначено в [10–12], породжують структурну і параметричну невизначеність під час оцінювання внутрішнього стану робототехнічного комплексу та зовнішнього середовища його функціонування.

Тому, для урахування даної невизначеності в процесах аналізу, синтезу та використання ІКС за призначенням, першочергового значення набуває задача виявлення джерел дестабілюючих факторів і оцінювання характеру їхнього впливу на інформаційні можливості такої системи.

Мета статті – аналіз джерел і причин виникнення дестабілюючих факторів та формалізація їхнього впливу на інформаційні можливості ІКС БА.

Виклад основного матеріалу

Під БА будемо розуміти наземний адаптивний роботизований комплекс з ІКС управління.

Процес взаємодії сучасних БА з реальним зовнішнім середовищем, крім жорстко запрограмованих дій, передбачає використання алгоритмів адаптивного управління, тобто урахування під час формування керуючих сигналів первинної інформації як про стан самого автомобіля, положення його робочих органів і технологічного встаткування, так і про стан навколишнього середовища та об'єктів у робочій зоні. Така інформація, обсяг і характер якої визначаються призначенням БА та особливостями середовища його функціонування, формується за допомогою системи чутливих пристроїв – датчиків (або сенсорів). Дані датчики є одним з функціонально-необхідних елементів ІКС БА [13]. За своєю функціональністю зазначені сенсорні пристрої – це первинні перетворювачі, які реагують на підлягаючу виявленню величину (температура, тиск, переміщення, сила струму і тощо) та перетворюють її в іншу величину, зручну для подальшого використання, видаючи сигнал про її наявність та інтенсивність. Цей сигнал може бути будь-якої фізичної природи, обумовленої принципом дії сенсорного пристрою, але в БА перевага віддається електричному сигналу, тому що переважна більшість технічних систем, у яких він буде використовуватися – електричні або електромеханічні.

Таким чином, джерелами інформації для керуючої системи сучасного БА є сукупність різноманітних сенсорних пристроїв, які за своїм призначенням і завданням, що ними вирішуються, можна поділити на два класи: сенсорні пристрої внутрішнього стану та сенсорні пристрої зовнішнього середовища БА [14].

Сенсори першого класу призначені для контролю над функціонуванням механізмів і систем виявлення й реєстрації параметрів, що характеризують внутрішній стан БА.

Все різноманіття датчиків внутрішнього стану класифікується за певними ознаками відповідно до їхнього функціонального призначення, принципів побудови та дії. Узагальнена класифікація датчиків внутрішнього стану що можуть застосовуватися в ІКС БА наведена на рис. 1.

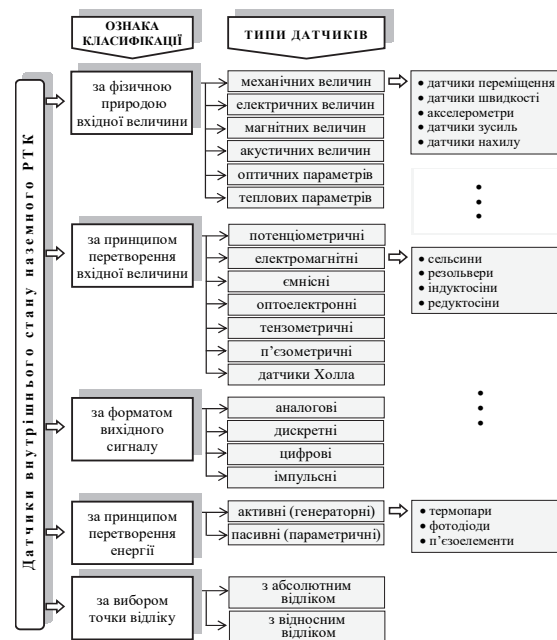


Рис. 1. Класифікація датчиків внутрішнього стану БА

Слід відмітити, що головними ознаками даного класу сенсорних датчиків є величина, що виявляється сенсором та принцип його дії.

У контексті даних ознак, необхідно зауважити, що точність перетворення вхідної величини у корисний сигнал суттєво залежить від лінійності статичної характеристики цих датчиків. Відхилення же від лінійності статичної характеристики веде до зростання погрішності перетворення вхідної величини в електричний сигнал.

В теперішній час в безпілотних технологіях автомобілебудування, із вказаного класу датчиків, найбільшого поширення отримали датчики механічних величин датчики переміщення, швидкості, прискорення й зусилля (моменту). У якості таких датчиків використовуються потенціометричні, електромагнітні, емнісні, оптоелектронні, гальваноманітні (на ефекті Холла) та інші пристрої.

Для цих датчиків одним з важливих показників є погрішність від нелінійності їх функції перетворення, яка для сучасних зразків лежить у межах від 0,01% до 5% [15–16].

Величину швидкості лінійного та кутового переміщення можна отримати диференціюванням сигналу від розглянутих вище датчиків переміщення, або за допомогою датчиків, що безпосередньо сприймають швидкість, – датчиків швидкості. Ці датчики теж породжують погрішність, наприклад, тахогенератори постійного струму можуть мати мінімальну погрішність ~ 0,2% [16].

Датчики прискорення (акселерометри), які призначені для вимірювання лінійних і кутових прискорень як самого БА, так і його окремих рухомих елементів мають рівень похибки виміру від 0,2–0,5% до

1% в залежності від типу чутливого елемента датчика. Датчики з технологією MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) характеризуються похибкою вимірювань в повному температурному діапазоні до 180°C, яка не перевищує 1,5 % [17].

Датчики зусиль (моментів) використовуються в БА для забезпечення безпечного функціонування та захисту їх конструкції від перевантажень. У якості таких датчиків застосовуються розглянуті вище датчики прискорення. Похибка цих датчиків – десяти й соті частки відсотка.

При створенні ІКС БА, як правило, включають декілька сенсорних пристроїв, тому всі її наступні ланки, що здійснюють приймання сигналів від датчиків та перетворювання їх у сигнали керування, є багатоканальними, а сама величина, що виявляється – вектором. Загальним випадком таких багатоканальних систем є розподілені системи, у яких датчики просторово рознесені, у тому числі, можливо, і по різних об'єктах. З розвитком комп'ютерних технологій вони стали широко використовуватися як мережеві багатоканальні розподілені ІКС, що сприяло розробці мультиагентних систем. У таких багатоканальних ІКС центральною проблемою стає завдання інтелектуального аналізу та інтеграції даних, що знімаються з різних датчиків, побудови системи цілісного сприйняття інформації та формування знань про стан як самого БА, так і навколишнього середовища.

Сенсори другого класу – сенсорні системи (група датчиків), що видають аналітично органам почуття живих істот інформацію про навколишнє зовнішнє середовище і призначені для активного моніторингу параметрів зовнішнього середовища, виявлення і контролю стану інших об'єктів в зоні функціонування БА.

За властивостями і параметрами зовнішнього середовища, що виявляються, сенсорні системи наземного робототехнічного комплексу можна розділити на три групи [15]:

– системи, що дають загальну картину навколишнього середовища з наступним виділенням окремих об'єктів, значимих для виконання наземним БА своїх функцій;

– системи, що визначають різні фізико-хімічні властивості зовнішнього середовища та його об'єктів, врахування яких необхідне під час виконання БА конкретної операції;

– системи, що визначають координати місця розташування та параметри руху БА, включаючи його координати відносно об'єктів зовнішнього середовища й зусилля взаємодії з ними.

До першої групи сенсорних систем належать системи технічного зору та різного типу локатори, що використовують випромінювання для вимірювання відстані до навколишніх предметів різні дов-

жини хвиль: радары, лідари (скануючи лазерні далекоміри), інфрачервоні та ультразвукові далекоміри та ін.

Системи технічного зору забезпечують одержання відеозображень з робочих зон, їх перетворення, обробку та інтерпретацію за допомогою спеціалізованих мікропроцесорних систем або персонального комп'ютера, а також передачу результатів керуючому пристрою роботи технічного комплексу. Візуальна інформація в системах технічного зору сприймається й перетворюється в електричні сигнали за допомогою відеодатчиків – оптоелектронних перетворювачів, що працюють у діапазонах видимого або інфрачервоного світла. Серед різних сенсорних систем системи технічного зору мають найбільшу інформативну ємність, забезпечуючи за деякими оцінками від 80 до 90% усієї необхідної інформації для успішного функціонування БА.

Сучасний етап розвитку систем технічного зору БА характеризується застосуванням методів візуалізації інформації, одержуваної від різного типу сенсорних систем. Насамперед – це системи, які використовують інші ділянки спектру електромагнітних випромінювань: радіодіапазони ("радіобачення"), ультрафіолетовий, рентгенівський та гамма-променевий діапазони. За суттю, така візуалізація заснована на обчислювальних методах відновлення зображень по їхніх проекціях. У результаті комп'ютерної обробки одержуваної відеоінформації синтезується об'ємна модель зовнішнього середовища. Зрозуміло, це незмірно інформативніше традиційних стереозображень і дозволяє здійснювати відповідно більш якісне планування та керування рухом БА. Тому, загальною тенденцією розвитку систем технічного зору стає удосконалення алгоритмів обробки відеоінформації, включаючи адаптацію до зовнішніх умов і завдань, що необхідно виконати автомобілю, шляхом зміни структури й налаштування параметрів ІКС БА [18].

Локаційні сенсорні системи призначені для виявлення рухливих і нерухливих об'єктів, визначення місця їхнього розташування, розмірів і швидкості руху. Безумовною перевагою таких пристроїв є можливість безконтактного функціонування, тобто на відстані від об'єкта, часто досить значному. При створенні локаційних сенсорів використовуються широкий спектр різних фізичних методів: радіохвильових, оптичних, акустичних, магнітних, теплових, електричних, електромагнітних, що дозволяють реалізувати принципи як пасивної, так і активної локації [15].

Друга група сенсорних систем найбільш різноманітна: вимірювачі геометричних параметрів, щільності, температури, оптичних властивостей та ін. Сенсорні системи даної групи реалізуються за допомогою датчиків фізичних величин, розглянутих раніше.

Третя група сенсорних систем визначає параметри, що характеризують положення самого наземного робототехнічного комплексу у просторі. Це вимірювачі його географічних координат у просторі (спутникові або інерціальні системи навігації), вимірники кутових координат (гіроскопи), вимірники переміщення й швидкості, у тому числі й відносно окремих об'єктів зовнішнього середовища аж до фіксації зіткнення з ними [15].

Інерціальні навігаційні системи здатні забезпечити точні вимірювання навігаційних параметрів БА у будь-яких умовах, не випромінюючи при цьому ніяких сигналів. Крім того, вони добре захищені від впливу зовнішніх шумів. Технічну базу сучасних інерціальних навігаційних систем складають гіроскопічні системи та акселерометри, виконані за MEMS-технологією. Точність даних навігаційних систем значною мірою залежить від плавності ходу БА та від наявності опорних пунктів з відомими координатами за маршрутом руху. Головним недоліком інерціальних навігаційних систем є помилки у визначенні координат БА, які накопичуються згодом, що обумовлено насамперед одержанням цих координат шляхом інтегрування. Це обумовлює необхідність регулярно усувати такі помилки. Основний спосіб вирішення даної проблеми – використання супутникових систем позиціонування.

Визначення координат БА у будь-якій точці земної поверхні в супутниковій радіонавігаційній системі здійснюється по сигналах супутників, розташованих на навколосемних орбітах, які забезпечують визначення координат об'єктів з точністю в одиниці сантиметрів. Разом з тим, стан навколишнього середовища в зоні БА (наявність об'єктів, що утворюють радіотінь, перешкоди від багатьох наземних радіоджерел та магнітних бурь, а також радіопроти́дія) суттєво впливає на безперервність та надійність доступу до навігаційної інформації і може призвести до погіршення точності навігаційних визначень. Одним з перспективних напрямків усунення вказаної проблеми є комплексне використання інформації супутникових радіонавігаційних систем й наземних засобів координатно-часового та навігаційного забезпечення, а одним з основних методів боротьби з перешкодами – просторова адаптивна фільтрація прийнятих навігаційних сигналів [19].

Слід зазначити, що отримані за допомогою датчиків або сенсорних систем БА телеметричні дані завжди містять певний процент похибок вимірювання. Це негативно відображається на ефективності функціонування ІКС БА. Похибки вимірювання обумовлені впливом низки різного виду дестабілізуючих факторів на процеси отримання і наступної обробки вимірювальної інформації щодо параметрів

внутрішнього стану БА та його навколишнього середовища. Носячи випадковий характер дестабілізуючі фактори складають джерело додаткових погрешностей вимірювання для формування сигналів керування виконавчими системами БА.

Отже за результатами аналізу джерел виникнення дестабілізуючих факторів під БА будемо розуміти наземний адаптивний роботизований комплекс з ІКС, що функціонує в умовах постійного впливу дестабілізуючих факторів.

Врахування впливу дестабілізуючих факторів на ефективність функціонування ІКС БА неможливо без детального аналізу причин та природи їх виникнення.

За місцем виникнення дестабілізуючі фактори можливо поділити на зовнішні, котрі обумовлені станом середовища вимірювання (спостереження), та внутрішні (внутрісистемні), які притаманні самої ІКС БА. Якщо джерелом виникнення зовнішніх дестабілізуючих факторів є процеси природного та штучного походження у навколишньому середовищі, то внутрішні дестабілізуючі фактори обумовлені процесами, які виникають в ході безпосереднього функціонування БА в цілому та його окремих систем, механізмів та пристроїв зокрема

З точки зору теорії електромагнітних вимірювань зовнішні дестабілізуючі фактори, наприклад, для радіотехнічної ІКС можна з достатнім ступенем достовірності ототожнити з електромагнітними перешкодами. В якості електромагнітної перешкоди може фігурувати практично будь-яке електромагнітне явище природного або штучного походження в широкому діапазоні частот, здатне негативно впливати на роботу апаратної складової ІКС БА. Слід мати на увазі, що перешкода може створюватися або фізичною величиною, яка не вимірюється датчиками даної ІКС, але впливає на результат вимірювань, або самою вимірюваною фізичною величиною, що змінює характеристику засобу вимірювання та приводить до порушення пропорційності між вимірюваною величиною і результатом вимірювання.

Наведемо коротку класифікацію зовнішніх дестабілізуючих факторів – перешкод, яка широко використовується інженерами, що працюють в області електромагнітної сумісності, і може бути адекватно застосована до радіотехнічної ІКС БА (рис. 2).

В контексті даних досліджень слід підкреслити, що в залежності від джерела електромагнітні перешкоди поділяються на природні та штучні. До перешкод природного походження належать:

– атмосферні, утворювані електричними процесами в атмосфері, головним чином грозовими розрядами (атмосферика);

– космічні, такі, що викликаються електромагнітним випромінюванням Сонця, зірок і Галактики;

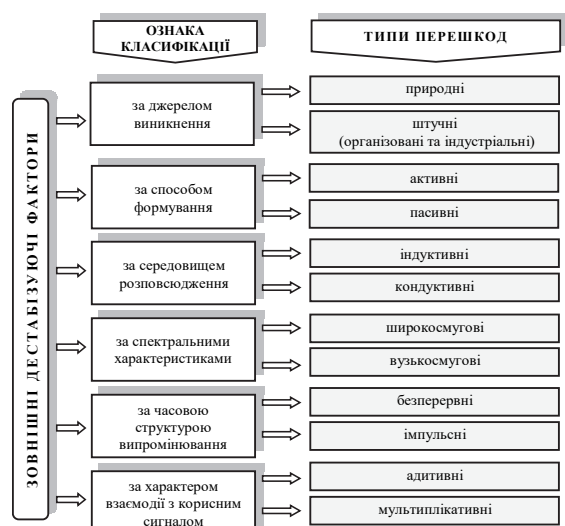


Рис. 2. Класифікація зовнішніх дестабілізуючих факторів для радіотехнічної ІКС БА

– спорадичні електромагнітні випромінювання навколземного простору, що викликаються потоками заряджених часток в іоносфері і магнітосфері;
 – віддзеркалення від метеорологічних утворень (дощ, сніг, град, хмари), земній і водній поверхні.

Штучні перешкоди створюються пристроями, що вимірюють енергію електромагнітних коливань, або відбивачами, які розсіюють енергію падаючих на них радіохвиль.

Основним наслідком дії перешкоди є поява погрішності вимірювання. Для усунення впливу перешкод доцільно, якщо це можливо, виключити причини їх виникнення. Способи боротьби з перешкодами значною мірою залежать від їхнього спектрального складу, виду вимірювального сигналу й типу самої перешкоди.

Перелічимо найбільш загальні й важливі причини існування джерел внутрісистемних збурень (перешкод) у будь-якій реальній системі обробки сигналів, що входить до складу ІКС БА. Серед цих причин виділимо:

- по-перше, закладену глибоко в природі речей проблему теплового (внутрішнього) шуму, яка пов'язана з дискретною будовою речовини і статистичною природою фізичних величин;
- по-друге, проблему, викликану практичною необхідністю еквівалентної заміни нескінченної безлічі безперервних величин їх дискретними аналогами обмеженої розмірності;
- по-третє, проблему відсутності ізоморфізму у будь-якій реальній інформаційно-вимірювальній системі.

Виходячи зі специфіки реального прояву в системі кожної із цих причин, джерела внутрісистемних збурень можна умовно розділити на класи, як показано на рис. 3. Розглянемо коротко кожний з виділених класів.



Рис. 3. Джерела внутрісистемних збурень, що впливають на функціонування інформаційно-керуючої системи РТК

Флуктуації електричних сигналів в пасивних і активних радіоелементах апаратної складової ІКС можна пояснити таким чином. Багато фізичних величин представляють результат усереднення по великій кількості індивідуальних часток, поведження яких підкоряється випадковому закону.

Випадковий тепловий рух носіїв заряду в будь-якому провіднику викликає випадкову різницю потенціалів на його кінцях. Ця різниця потенціалів флюктує біля нульового середнього значення, а її середній квадрат пропорційний шумовій температурі в градусах Кельвіна. Виникаюча в результаті внутрісистемна перешкода називається тепловим або внутрішнім шумом ІКС.

Спектр такої перешкоди рівномірний, тобто шум "білий", і містить складові аж до нескінченно високих частот, містячи в собі нескінченну енергію. Навіть при ізоморфних каналах обробки внутрішній шум має властивість декореляції й тому є одним з основних істотних факторів, які визначають потенційні можливості ІКС БА в досягненні поставленої мети.

Внутрішній шум, як реальне поняття внутрісистемної перешкоди, завжди враховується у відомих підходах до синтезу будь-яких інформаційних систем. Однак, обмеження поняття "внутрісистемна перешкода" поняттям "внутрішній шум" істотно звужує проблему обробки інформації у системах, що адаптуються до зовнішніх перешкод в умовах присутності внутрісистемних збурень іншого роду.

Кінцевомірна дискретизація аналогових величин припускає заміну елементів нескінченної безлічі безперервних значень реальних сигналів елементами кінцевої безлічі в тимчасовій або просторовій областях. Природно, що перехід від безперервних величин до їх дискретних кінцевомірних аналогів супроводжується появою джерел внутрісистемних

збурень. До внутрісистемних збурень, обумовлених дискретизацією сигналів у часовій області, відносяться: квантування процесу, що спостерігається; "щілинні" похибки та випадковий розкид ("тремтіння") часових відліків; ефекти округлення результатів і обмеження обсягу вибірки спостережень [20–21].

Відсутність ізоморфізму в будь-якій реальній багатомірній ІКС – об'єктивний факт, обумовлений самою природою речей, тому що в природі немає і не може бути нічого однакового. Відсутність ізоморфізму в реальній системі породжує декореляцію процесів, що спостерігаються. До декорелюючих факторів, насамперед, можна віднести неідентичність (взаємна неузгодженість) частотних характеристик інформаційних каналів. Дана неідентичність є джерелом випадкових амплітудних і фазових збурень, що виникають у трактах прийому, та причиною зниження ефективності ІКС БА під час виділення корисних сигналів на фоні корельованих перешкод. Наявність неідентичності частотних характеристик багатоканальних трактів обробки супроводжується енергетичними втратами корисного сигналу і зниженням точності вимірювання його параметрів.

Похибки вимірювання, які обумовлені впливом внутрісистемних дестабілізуючих факторів, відносяться до категорії неусувних, тому саме вони будуть визначати потенційні можливості вимірювальних каналів (радіотехнічних, квантових, телевізійних, оптико-електронних та ін.) ІКС щодо точності вимірювання параметрів внутрішнього стану та навколишнього середовища БА.

Отже з врахуванням аналізу інформаційних джерел та причин виникнення дестабілізуючих факторів характерною особливістю роботи реальної ІКС БА є існування невизначеності ситуації відносно істинного стану зовнішнього середовища та елементів самої системи.

Виходячи з логіки проведених міркувань змодельовано можливі варіанти впливу апріорної невизначеності ситуації на інформаційні можливості ІКС БА. Оцінка результатів для кожного варіанту такого впливу здійснюється на основі ентропії.

Розглянемо вплив невизначеності параметрів зовнішнього середовища на інформаційні можливості ІКС БА коли на її вхід надходить сигнал перешкоди $\eta(t)$ від зовнішнього джерела. Ентропію випадкового процесу на виході системи можна представити таким чином:

$$H[Y(t), n(t)] = H[Y(t) + n(t)], \quad (1)$$

де $n(t)$ – внутрішні шуми системи;

$Y(t)$ – випадковий процес на виході системи за умови відсутності корисного сигналу.

За умови включення режиму адаптації до зовнішньої перешкоди формується параметричний вектор $W_X(t)$, котрий впливає на ентропію процесу на виході адаптивної системи наступним чином

$$H[Y\{W_X(t), n(t)\}] = H[Y\{W_X(t)\} + n(t)], \quad (2)$$

де $Y\{W_X(t)\}$ – випадковий процес на виході адаптивної системи, який зазнає параметричної обробки за відповідним алгоритмом адаптації.

В процесі адаптації системи параметричний вектор $W_X(t)$ сходиться до оптимального в сенсі заданого критерію

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [W_X(t)] = W_{opt}. \quad (3)$$

Відповідно, можна припустити, що

$$\lim_{W_X(t) \rightarrow W_{opt}} Y[W_X(t)] = Y[W_{opt}] = 0. \quad (4)$$

В такому випадку невизначеність ситуації адаптивної системи зводиться до мінімуму і фактично визначається тільки ентропією внутрішнього шуму $H[n(t)]$, зокрема:

$$\lim_{W_X(t) \rightarrow W_{opt}} H[Y\{W_X(t)\}, n(t)] = H[n(t)]. \quad (5)$$

На рис. 4 представлена діаграма, яка умовно відображує ентропію процесу на виході ІКС БА, що працює в двох режимах: режимі виключення або режимі включення алгоритму адаптації системи до параметрів зовнішнього середовища.

З аналізу цієї діаграми впливає наступне: оскільки апріорна невизначеність вихідного процесу становить $H[Y(t), n(t)]$, а апостеріорна невизначеність – $H[n(t)]$, то невизначеність, яка була усунена в результаті адаптації, складає різницю, яка носить назву кількості інформації:

$$I = H[Y(t), n(t)] - H[n(t)]. \quad (6)$$

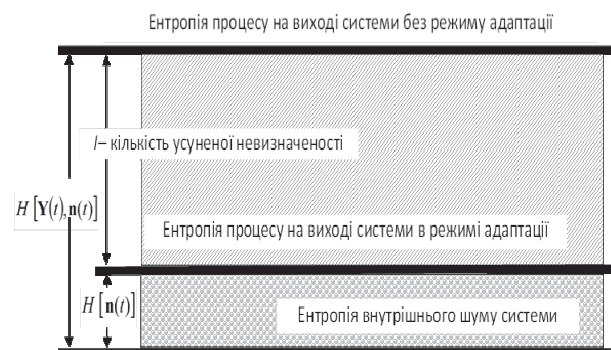


Рис. 4. Потенційна інформаційна можливість ІКС БА

Таким чином, різниця зазначених ентропій визначає середню кількість інформації про процес, що спостерігається на виході адаптивної системи і вказує на кількість усуненої невизначеності. За умови відсутності внутрісистемних збурень дана діаграма відображає потенційні інформаційні можливості ІКС БА.

Разом з тим потрібно зазначити, що кількість інформації формально рівняється ентропії. Дійсно, ентропія (невизначеність) існує до досліду, тоді як інформація з'являється після проведення експерименту. Відповідно, зазначені категорії мають різний фізичний зміст.

За наявності в ІКС БА випадкових внутрісистемних збурень, параметричний вектор системи $W_X(t)$ не сходиться в процесі адаптації до еталонного значення і рівняється

$$\lim_{W_X(t) \rightarrow \infty} [W_X(t)] = W_{opt} + \Delta W = \tilde{W}, \quad (7)$$

де ΔW – випадковий вектор внутрісистемних збурень.

Якщо параметричний вектор внутрісистемних збурень ΔW за нормою задовольняє умові $\|\Delta W\|^2 \ll \|W_{opt}\|^2$, то процес, що встановився на виході адаптивної системи в умовах внутрісистемних збурень буде дорівнювати

$$Y(W_{opt} + \Delta W) = Y(W_{opt}) + \Psi_{\Delta W}(W_{opt})\Delta W, \quad (8)$$

де $\Psi_{\Delta W}(W_{opt})$ – похідна функції в точці з координатами.

За такої логіки ентропія процесу на виході ІКС БА в умовах внутрісистемних збурень перевершує ентропію внутрішнього шуму системи $H[n(t)]$ (рис. 5) та становить:

$$\begin{aligned} \lim_{W_X(t) \rightarrow \tilde{W}} H[Y\{W_X(t)\}, n(t)] = \\ = H[\Psi_{\Delta W}(W_{opt})\Delta W + n(t)] \end{aligned} \quad (9)$$

Представлена на рис. 5 діаграма наглядно демонструє втрати середньої кількості інформації на виході ІКС БА в умовах внутрісистемних збурень.

Інформаційні втрати в будь-якій системі, як відомо, призводять до зниження її ефективності в сенсі реалізації потрібного критерію оптимальності. Тому, наряду з інформаційним підходом до дослідження властивостей ІКС БА доцільно окремо розглянути питання впливу внутрісистемних збурень m -мірного параметричного вектора даної системи на показник її ефективності.

На основі варіативно-параметричного підходу можна показати, що в умовах внутрісистемних збурень збільшення розмірності m -мірного параметри-

чного вектора супроводжується втратами, котрі призводять до зниження величини показника ефективності системи J у порівнянні з його потенційним значенням J_0 . Якісні залежності даного показника адаптивної ІКС від розмірності m її параметричного вектору при фіксованому рівні дисперсії $\sigma_{W_X}^2$ внутрісистемних збурень ΔW , представлені на рис. 6.

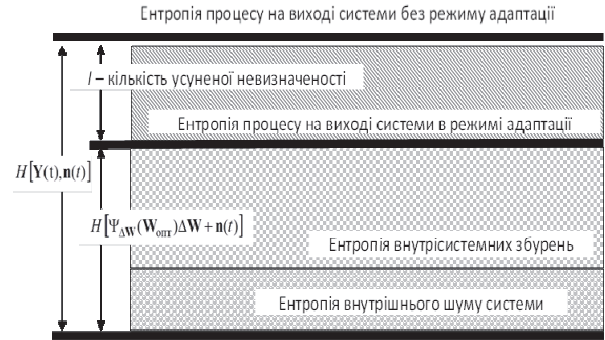


Рис. 5. Зниження інформаційних можливостей ІКС БА в умовах внутрісистемних збурень

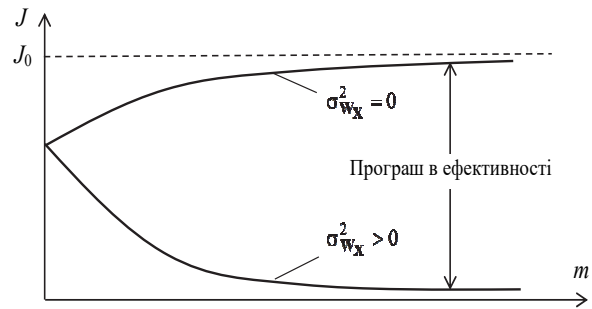


Рис. 6. Якісна залежність показника ефективності ІКС БА від розмірності параметричного вектору $W_X(t)$

Аналіз графіків цих залежностей показує, що, за умови відсутності внутрісистемних збурень, збільшення розмірності параметричного вектору адаптивної системи призводить до нелінійного зростання показника її ефективності (крива $\sigma_{W_X}^2 = 0$).

При цьому крива прагне до його потенційного значення J_0 , що характерно для детермінованої ситуації.

В умовах наявності внутрісистемних збурень спостерігається протилежна ситуація (крива $\sigma_{W_X}^2 > 0$). Програш ефективності системи може перевершити допустимий рівень інформаційних втрат і виділення будь-якої корисної інформації на виході ІКС БА стане неможливим. Розв'язання зазначеного протиріччя знаходиться в площині розробки спеціальних алгоритмів параметричної адаптації, котрі локально-інваріантні до рівня внутрісистемних збурень та інших дестабілізуючих факторів,

що впливають на якість функціонування ІКС БА. З врахуванням вище викладених міркувань наведемо модельний варіант БА ІКС (рис. 7.), який являє собою структурно-функціональне об'єднання різносенсорних каналів отримання інформації та апаратно-програмних засобів процесної обробки і формування сигналів для управління та прийняття рішень. Якість функціонування БА в детермінованих і недетермінованих середовищах в значній мірі залежить від ефективності його інформаційно-вимірювальної системи.

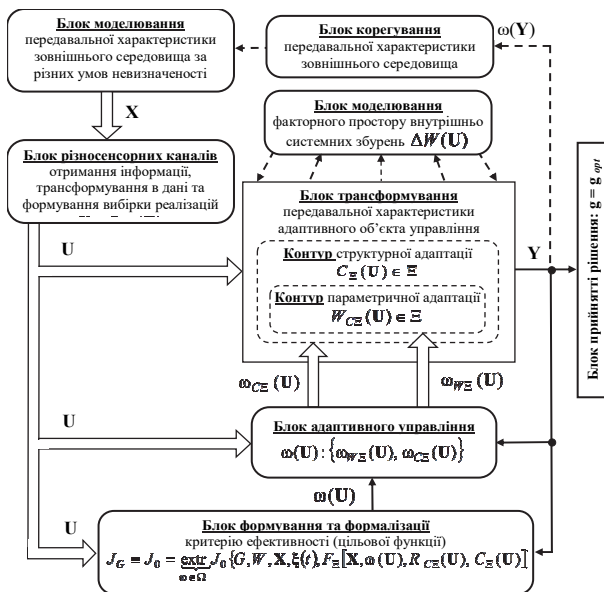


Рис. 7. Блок-схема моделі БА

Висновки

Таким чином сенсорні системи моніторингу внутрішнього стану ІКС БА та сенсори моніторингу навколишнього середовища, маючи відповідні граничні значення погрешностей вимірювання вносять відповідні похибки у процес перетворення вхідних фізичних величин у корисний вихідний сигнал.

Спираючись на загальні світові тенденції розвитку сучасної робототехніки у цілому, та її сенсорних систем, зокрема, ІКС БА віднесена до класу

складних радіотехнічних систем, принцип дії яких заснований на використанні електричних та електромагнітних полів для організації взаємодії їхніх складових частин.

Саме характер цієї взаємодії обумовлює існування невизначеності ситуації відносно істинного стану зовнішнього середовища та елементів реальної ІКС. Природним проявленням такої невизначеності є похибки вимірювання параметрів фізичних об'єктів спостереження, що негативно відбивається на якості процесу формування сигналів управління ІКС БА.

Джерелом виникнення даної невизначеності, у значній мірі, є вплив зовнішніх та внутрісистемних дестабілізуючих факторів.

Основними зовнішніми дестабілізуючими факторами для ІКС БА є електромагнітні перешкоди природного та штучного походження.

Внутрісистемна дестабілізація систем управління подібного класу обумовлена тепловим (внутрішнім) шумом, погрешністю дискретизації аналогових величин та відсутністю ізоморфізму у реальній системі.

За результатами аналізу впливу дестабілізуючих факторів на інформаційні можливості системи управління БА проведена формалізація цього впливу на основі ентропійного підходу. В результаті такої аналітичної формалізації побудовані діаграми, що умовно відображують ентропію процесу на виході ІКС БА, яка може працювати у двох режимах: режиму виключення або режиму включення алгоритму адаптації системи до параметрів зовнішнього середовища та наглядно демонструють втрати середньої кількості інформації на виході адаптивної ІКС БА при адаптації до стану зовнішнього середовища в умовах внутрісистемних збурень.

Отже практична значимість отриманих в роботі аналітичних виразів на основі ентропійного підходу дає змогу аналітично оцінити потенційний рівень впливу дестабілізуючих факторів на ефективність функціонування ІКС БА.

Список літератури

1. Клименко В.В. Проблема інформаційної взаємодії безпілотного автомобіля в невизначених і конфліктних умовах експлуатації / В.В. Клименко, О.П. Сакно // Збірник наукових праць міжнародної науково-практичної конференції "Новітні технології розвитку автомобільного транспорту" Харківського національного автомобільного університету. – 2018 – С. 36-39.
2. Аналіз джерел інформаційної взаємодії роботизованого автомобіля в невизначених і конфліктних умовах експлуатації / В.В. Клименко, Д.О. Котов, Р.О. Семенов, С.В. Бойченко, М.В. Кваша // Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів "Актуальні проблеми автоматизації та управління Луцького національного технічного університету". – 2018. – С. 178-182.
3. Problem of sustainability of decisions of information problems in technological vision systems of unwinded vehicles / V. Klimentko, V. Poliakov, O. Sakno, T. Kolesnikova, N. Velmagina, Y. Hontar, S. Tomchuk // XXIV International scientific and technical conference "Transport, ecology - sustainable development". – 2018. – P. 65-73.
4. Большой энциклопедический словарь. – 1-е изд // Гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Большая российская энциклопедия, 1991. – 862 с.

5. Гиг Дж. Ван. Прикладная общая теория систем / Дж. Ван. Гиг. – М.: Мир, 1981. – 336 с.
6. НДР “Бар’єр”, Держ.ресстр. № 0101U002533. – Військова академія, Одеса, 2017. – 110 с.
7. Васин В.В. Некорректные задачи с априорной информацией / В.В. Васин, А.Л. Агеев. – Екатеринбург: Наука, 1993. – 262 с.
8. Рішення інформаційних завдань в системах технічного зору безпілотних автомобілів / В.В. Клименко, В.М. Поляков, О.П. Сакно, Т.М. Колеснікова // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – 2018. – № 2(11). – С. 79-84.
9. Скачков В.В. Развитие теории и практики повышения качества адаптации информационных радиотехнических систем к внешним помехам в условиях внутрисистемных возмущений: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук: 05.12.17; защищена 04.07.2007, утв. 13.02.2008 / Скачков Валерий Викторович. – Одесса, 2007. – 434 с.
10. Скачков В.В. Влияние внутрисистемных помех на эффективность адаптивной обработки сигналов при квадратичной критериальной функции / В.В. Скачков // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1997. – Т. 40, № 10. – С. 34-40.
11. Скачков В.В. Проблема повышения качества измерения информативных параметров радиосигналов в условиях аддитивных шумов / В.В. Скачков, В.И. Павлович // П’ята Міжнародна науково-практична конференція “Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості”. – 2015. – С. 96-99.
12. Энтропийный подход к исследованию информационных возможностей адаптивной радиотехнической системы при внутрисистемной неопределённости // В.В. Скачков, В.В. Чепкий, Г.Д. Братченко, А.Н. Ефимчиков // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2015. – № 6. – С. 3-12.
13. Юревич Е.И. Основы робототехники / Е.И. Юревич. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
14. Multi-agent robotic systems in collaborative robotics / S. Vorotnikov, K. Ermishin, A. Nazarova, A. Yuschenko // Lecture Notes in Computer Science. – 2018. – Vol. 11097 LNAI. – P. 270-279.
15. Юревич Е.И. Управление роботами и робототехническими системами / Е.И. Юревич. – СПб.: БХВ-Петербург, 2000. – 85 с.
16. Датчики / В.М. Шарапов, Е.С. Полищук, Н.Д. Кошевой. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с.
17. Алексеев В. Новые многофункциональные МЭМС – датчики движения производства STMicroelectronics / В. Алексеев // Компоненты и технологии. – 2015. – № 10. – 28-31 с.
18. Техническое зрение роботов / В.И. Мошкин, А.А. Петров, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
19. Герасименко К.В. Аналіз способів подавлення сигналів супутникових радіонавігаційних систем навмисними перешкодами / К.В. Герасименко // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – № 4(44). – С. 61-63.
20. Внутрисистемные возмущения и их источники в информационных радиотехнических системах: доповідь / В.В. Скачков, В.А. Манько, А.Н. Ефимчиков, О.И. Лещенко // Інформаційно-вимірювальні технології в метрології, технічне регулювання та менеджмент якості: збірник матеріалів Третьої Всеукраїнської науково-практичної конференції. – 2013. – С. 121-124.
21. Источники внутрисистемных возмущений в информационных радиотехнических системах / В.В. Скачков, Г.Д. Братченко, В.А. Манько, О.И. Лещенко // Метрологія та прилади. – 2013. – № 2(41). – С. 222-225.

References

1. Klimenko, V.V. and Sakno, O.P. (2018), “Problema informatsiyanoi vzaemodiyi bezpilotnoho avtomobilya v nevznachenih i konfliktnih umovah ekspluatatsiyi” [Problem of informational interaction of unmanned car in uncertain and conflict conditions of operation], *Scientific works of the annual international scientific-practical conference “Innovative technologies for the development of automotive transport to the Kharkiv National Automobile and Road University”*, pp. 36-39.
2. Klimenko, V.V., Kotov, D.O., Semenenko, R.O., Boichenko, S.V. and Kvasha, M.V. (2018), “Analiz dzherel informatsiyanoi vzaemodiyi robotizovanogo avtomobilya v nevznachenih i konfliktnih umovah ekspluatatsiyi” [Analysis of sources of information interaction robotic car in uncertain and conflict conditions of operation], *Scientific Works of the VI International Scientific and practical internet conference of young scientists and students “Actual problems of automation and management of Lutsk National Technical University”*, pp. 178-182.
3. Klimenko, V., Poliakov, V., Sakno, O., Kolesnikova, T., Velmagina, N., Hontar, Y. and Tomchuk, S. (2018), Problem of sustainability of decisions of information problems in technological vision systems of unwinded vehicles, *Collection of reports XXIV – scientific and technical conference with the international participation “Transport, ecology - sustainable development”*, pp. 65-73.
4. Prokhorov, A.M. (1991), “*Bol'shoy enciklopedicheskiy slovar*” [Big Russian dictionary], Big Russian Encyclopedia, Moscow, p. 862.
5. Gig J. Wang (1981) “*Prykladnaya obshchaya teoriya sistem*” [Applied general systems theory], Myr, Moscow, 336 p.
6. State registration “0101U002533” (2017), SEW “Bar’yer” [Barrier], Military Academy, Odessa, 110 p.
7. Vasin, V.V. and Ageev, A.L. (1993), “*Nekorrektnye zadachy s apyornoy informatsiyey*” [Incorrect tasks with a priori information], Nauka, Yekaterinburg, 262 p.
8. Klimenko, V.V., Polyakov, V.M., Sakno, O.P. and Kolesnikova, T.M. (2018), “Rishennya informatsiynykh zavdan' v systemi tekhnichnoho zoru avtomobiliv” [Solving information problems in systems of technical vision of unmanned cars], *Modern technologies in mechanical engineering and transport*, No. 2(11), pp. 79-84.
9. Skachkov, V.V. (2007), “*Razvitie teorii i praktiki povyisheniya kachestva adaptatsii informatsionnykh radiotekhnicheskikh sistem k vneshnim pomехam v usloviyah vnutrisistemnykh vozmuscheniy: dySSERTATION*” [Development of the theory and practice of improving the quality of adapting information radio systems to external interference in the conditions of intra-system perturbations: dissertation], Odessa, 434 p.

10. Skachkov, V.V. (1997), "Vnutrishn'orozrizeni prymishchennya na efektyvnist' adaptivnoyi obrobky syhnaliv pry kvadratychnyi kryteriyi funktsiy" [The influence of intra-system interference on the efficiency of adaptive signal processing with a quadratic criterial function], *University News. Radio Electronics*, pp. 34-40.
11. Skachkov, V.V. and Pavlovich, V.I. (2015), "Problema povysheniya kachestva izmereniya informativnykh parametrov radiosignalov v usloviyakh additivnykh shumov" [Problem of improving the quality of measurement of informative parameters of radio signals in terms of additive noise], *Fifth International Scientific and Practical Conference "Metrology, Technical Regulation and Quality Assurance"*, Odesa, pp. 96-99.
12. Skachkov, V.V., Chepkii, V.V., Bratchenko, G.D. and Yefimchikov, A.N. (2015), "Entropiynny pidkhid do vyvcheniya informatsiynykh mozhlyvostey adaptivnoyi radiotekhnichnoyi systemy pry vnutrisistemnoyi nevyznachenosti" [An entropy approach to the study of information capabilities of an adaptive radio engineering system with intra-system uncertainty], *University News. Radio Electronics*, No. 6, pp. 3-12.
13. Yurevich, E.I. (2005), "Osnovy robototekhniky" [*Basics of Robotics*], BKHV - Petersburg, St. Petersburg, 416 p.
14. Vorotnikov, S., Ermishin, K., Nazarova, A. and Yuschenko, A. (2018), Multi-agent robotic systems in collaborative robotics, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 11097 LNAI, pp. 270-279.
15. Yurevich, E.I. (2000), "Upravleniye robotami i robototekhnicheskimi sistemami" [*Control of robots and robotic systems*], BKHV-Petersburg, St. Petersburg, 85 p.
16. Sharapov, V.M., Polishchuk, E.S. and Koshevoy, N.D. (2012), "Datchiki" [*Sensors*], Technosfera, Moscow, 624 p.
17. Alekseev, V. (2015), "Novyye mnogofunktsional'nyye MEMS-datchiki dvizheniya proizvodstva Microelectromechanical system" [New Multifunction Microelectromechanical systems – monitor sensors production STMicroelectronics], *Component and Technologies*, No. 10, pp. 28-31.
18. Moshkin, V.I., Petrov, A.A., Titov, V.S. and Yakushenkov, Y.G. (1990), "Tekhnicheskoye zreniye robotov" [*Technical vision of robots*], Mashinostroenie, Moscow, 272 p.
19. Gerasimenko, K.V. (2015), "Analiz sposobiv podavleniya signalov sputnikovyykh radonavigatsiynykh system navmishnimi pereshkodami" [Analysis of methods of suppressing signals of satellite radionavigation systems by deliberate obstacles], *Armament Systems of Arms and Military Equipment*, No. 4(44), pp. 61-63.
20. Skachkov, V.V., Man'ko, V.A., Yefimchikov, A.N. and Leshchenko, O.I. (2013), "Vnutrisistemnyye vozmushcheniya i ikh istochniki v informatsionnykh radiotekhnicheskikh sistemakh" [Internal perturbations and their sources in radio information systems], *Materials of the Third All-Ukrainian Scientific Practical Conference*, Odesa, pp.121-124.
21. Skachkov, V.V., Bratchenko, G.D., Man'ko, V.A. and Leshchenko, O.I. (2013), "Istochniki vnutrisistemnykh vozmushcheniy v informatsionnykh radiotekhnicheskikh sistemakh" [Sources of intra-system perturbations in information radio-engineering systems], *Metrology and Instruments*, No. 2(41), pp. 222-225.

Надійшла до редколегії 28.03.2019

Схвалена до друку 21.05.2019

Відомості про авторів:**Клименко Віктор Володимирович**

кандидат технічних наук доцент
старший науковий співробітник
Військової академії (Одеса),
Одеса, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8073-4404>

Сухін Олег Валерійович

начальник факультету
Військової академії (Одеса),
Одеса, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2804-0261>

Котов Денис Олександрович

викладач
Військової академії (Одеса),
Одеса, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6775-5593>

Сердюк Олексій Володимирович

викладач Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3600-0611>

Information about the authors:**Viktor Klimenko**

Candidate of Technical Sciences
Associate Professor Senior Research
of Military Academy,
Odesa, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8073-4404>

Oleg Sukhin

Head of Faculty
of Military Academy,
Odesa, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2804-0261>

Denis Kotov

Instructor
of Military Academy,
Odesa, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6775-5593>

Oleksii Serdjuk

Instructor of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3600-0611>

АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ И ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ В ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЕ БЕСПИЛОТНОГО АВТОМОБИЛЯ

В.В. Клименко, О.В. Сухин, Д.О. Котов, О.В. Сердюк

В статье приведён анализ источников и причин возникновения дестабилизирующих факторов, имея случайный характер, порождают структурную и параметрическую неопределённость при оценке внутреннего состояния беспилотного автомобиля и внешней среды его функционирования. Наряду с этим представлена оценка характера влияния дестабилизирующих факторов на информационные возможности информационно-управляемой системы беспилотного автомобиля, при этом акцент в исследовании сделан на анализ погрешностей, которые датчики вносят в процесс преобразования входной физической величины в выходной сигнал. По результатам анализа влияния дестабилизирующих факторов на информационные возможности системы управления беспилотного автомобиля проведена формализация этого влияния на основе энтропийной меры. В результате данной формализации построены диаграммы, которые условно отражают энтропию процесса на выходе информационно-управляющей системы беспилотного автомобиля. Такая система может работать в двух режимах: режим исключения или режим включения алгоритма адаптации системы к параметрам внешней среды и наглядно демонстрируют потери среднего количества информации на выходе адаптивной информационно-управляющей системы беспилотного автомобиля при адаптации к состоянию внешней среды в условиях внутрисистемных возмущений.

Ключевые слова: беспилотный автомобиль, информационно-управляющая система, разносенсорные независимые датчики, дестабилизирующие факторы, априорная неопределённость, избыточность системы, информационный канал.

ANALYSIS OF SOURCES AND CAUSES OF THE EMERGENCE OF THE DESTABILIZING FACTORS IN THE INFORMATION-CONTROLLED SYSTEM OF A UNMANNED CAR

V. Klimenko, O. Sukhin, D. Kotov, O. Serdjuk

The article provides an analysis of the sources and causes of destabilizing factors, having accident character, generate structural and parametric uncertainty in assessing the internal state of an unmanned (robotic) car and the external environment of its functioning. At the same time, an assessment is made of the nature of the influence of destabilizing factors on the information opportunities of the information-controlled system of an unmanned (robotic) car; with the study focusing on the analysis of the errors that the sensors bring in process of transformation the input physical quantity to the output signal. On the basis of the variation - parametric approach it is shown that in the conditions of intra-system perturbations an increase in the dimensionality of a parametric vector is accompanied by losses, which lead to a decrease in the value of the system efficiency indicator in comparison with its potential value. The analysis of the graphs of these dependences shows that, in the absence of intra-system perturbations, an increase in the dimension of the parametric vector of the adaptive system leads to a nonlinear increase in the indicator of its efficiency. Loss of system efficiency may exceed the permissible level of information loss and the allocation of any useful information at the output of the information-controlled system of the unmanned car will not be possible. According to the results of the analysis of influence of destabilizing factors on the information opportunities of the unmanned car management system, this influence was formalized on the basis of an entropy measure. As a result of this formalization, diagrams were built, conventionally reflecting the entropy of the process at the output of the information-controlled system unmanned car which can operate in two modes: the exclusion mode or the enable mode of the system adaptation algorithm to parameters of the external environment and clearly demonstrate the loss of the average amount of information at the output of the adaptive information management system of the unmanned car at adaptation to the state of the environment in conditions of intrasystem indignations.

Keywords: unmanned car, destabilizing factors, a priori uncertainty, system redundancy, information channel.