

Ентропійний аналіз процесу радіокерування рухомими об'єктами

Бичковський В. О., Реутська Ю. Ю.

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”, м. Київ, Україна

E-mail: reutska_rtf@ukr.net

На підставі макроскопічного підходу до аналізу процесу радіокерування встановлено співвідношення між швидкістю зміни ентропії об'єкта керування та швидкістю надходження керуючої інформації. Виконано декомпозицію системи радіокерування, враховано інформаційні зв'язки між об'єктом та керуючою частиною, встановлено необхідний час для зменшення ентропії до передбаченого значення. Проаналізована ситуація, яка виникає в умовах збільшення ентропії некеруваного об'єкта. Встановлено умову зменшення ентропії в разі надходження керуючої інформації та необхідний час керування. Проаналізована ситуація, коли є відомими потенційні можливості системи радіокерування. Розглянуто вплив втрат інформації в об'єкті керування на закономірність зміни ентропії. Встановлено необхідний час керування в умовах втрат інформації. Визначено можливість реалізації процесу керування в умовах втрат інформації.

Ключові слова: радіокерування; ентропія; інформація.

Вступ

Сучасні системи радіокерування (СРК) — це комплекс функціонально пов'язаних пристроїв, які вирішують задачу керування об'єктами або процесами за допомогою радіозасобів. В загальному переліку СРК особливе місце займають системи, призначенні для керування рухомими об'єктами [1–3]. Незважаючи на велику кількість елементів та пристроїв різноманітного призначення, такі СРК функціонують як єдине ціле, забезпечуючи рішення конкретної задачі — доставки керуваного об'єкта в район цілі з заданою точністю. Виходячи із сучасних наукових концепцій процеси керування рухомими об'єктами розгортаються у просторі та часі та нерозривно пов'язані з процесами перетворення речовини, енергії та інформації. Таким чином, стає зрозумілою доцільність використання математичного апарату теорії інформації для аналізу як процесів керування у цілому, так і процесів радіокерування рухомими об'єктами [4–6]. Статичний підхід до таких задач є досить відомим і базується на визначенні кількості інформації I , яку необхідно ввести в контур керування для зменшення ентропії об'єкта керування H від деякого початкового значення H_0 до кінцевого значення H_y [4,7]. В разі такого підходу динаміка процесу керування залишається прихованою, що не дає можливості встановити необхідний час керування, закономірності зменшення ентропії та співвідношення між основними показниками процесу керування.

Досить відомим є інформаційний підхід до опису процесу керування з використанням методу аналогій [5]. Але він не враховує специфіку процесу радіокерування рухомими об'єктами та передбачає застосування моделей та тлумачень, характерних для класичної теорії кіл. Отже, перехід на якісно новий рівень аналізу процесу радіокерування рухомими об'єктами необхідно розглядати як задачу актуальну та практично спрямовану.

1 Постановка задачі

Прийmemo до уваги, що при всій різноманітності СРК їх поєднує одна загальна риса: ентропія $H = H(t)$ об'єкту керування або процесу цілеспрямовано зменшується завдяки надходженню керуючої інформації $I = I(t)$. Ентропія H є об'єктивною характеристикою точності керування, а інформація I складається з початкової та робочої інформації [7]. Початкову інформацію утворює сукупність заздалегідь зібраних даних про властивості об'єкта керування, збурюючих впливах та інших факторів. Робоча інформація добувається в процесі керування. Необхідна кількість інформації для зменшення ентропії об'єкту керування від H_0 до H_y визначається за формулою

$$I = H_0 - H_y,$$

яка не дає можливості розглянути процес радіокерування в динаміці. Отже, необхідно скласти динамічну модель процесу радіокерування, яка розкриває

закономірності зміни ентропії об'єкту керування як в умовах відсутності так і наявності керуючої інформації. В процесі розв'язання поставленої задачі необхідно прийняти до уваги, що як закономірність зменшення ентропії, так і кількість керуючої інформації залежать від організації процесу керування та характеру інформаційного обміну між керуючою частиною та об'єктом керування. Сам процес керування може аналізуватися в межах деякого об'єму Q , площі S , кутів тощо.

2 Теоретичні викладки

З метою складання рівняння динаміки приймемо до уваги, що СРК вирішує просторово-часову задачу зустрічі об'єкта керування з ціллю за рахунок надходження керуючої інформації I . Деякий поточний об'єм Q , де знаходяться об'єкт керування та ціль, в процесі наведення зменшується. Якщо K — константа швидкості зменшення Q за рахунок надходження I , то можна записати

$$\frac{dQ}{Q} = -KdI. \quad (1)$$

Приймемо до уваги, що швидкість зміни кількості інформації в контурі керування об'єктом $C_n = dI/dt$, а ентропія $H = \ln Q$. Тоді, на підставі формули (1) визначаємо:

$$\frac{dH}{dt} = -KC_n. \quad (2)$$

Переходимо до зображень по Лапласу: $H^*(p) = L\{H(t)\}$, $C_n^*(p) = L\{C_n(t)\}$. Враховуючі початкові умови $t = 0$, $H = H_0$, на підставі формули (2) знаходимо

$$H^*(p) = \frac{H_0}{p} - \frac{KC_n^*(p)}{p}. \quad (3)$$

На підставі залежності (3) можна скласти структурну схему з відповідною передаточною функцією динамічної ланки.

Виконаємо декомпозицію системи та виділимо в ній керуючу частину (КЧ) та об'єкт керування (ОК). Нехай C_K — швидкість зміни кількості інформації з КЧ, C_n — швидкість сприймання інформації ОК. Якщо втрати інформації в ОК відсутні, то $C_n = C_K$.

На підставі формул (2), (3) знаходимо

$$H_0 - H = K \int_0^t C_n(t) dt,$$

$$Q = Q_0 \exp\left[-K \int_0^t C_n(t) dt\right].$$

Якщо $C_n = C_K = \text{const}$, то можна записати

$$H = H_0 - KC_n t, \quad (4)$$

$$Q = Q_0 \exp(-KC_n t).$$

На підставі формули (4) визначаємо час, необхідний для зменшення ентропії H від H_0 до H_y або Q від Q_0 до :

$$t_y = \frac{H_0 - H_y}{KC_n}, \quad (5)$$

$$t_y = \frac{1}{KC_n} \ln \frac{Q_0}{Q_y}.$$

Розглянемо ситуацію, коли об'єм Q в разі відсутності надходження керуючої інформації зростає: $dQ = K_2 Q dt$, де K_2 — константа швидкості зростання Q . Тоді, приймаючи до уваги, що $H = \ln Q$, можна записати

$$\frac{dH}{dt} = K_2. \quad (6)$$

На підставі формул (2), (6) описуємо ситуацію в разі надходження керуючої інформації:

$$\frac{dH}{dt} = K_2 - KC_n. \quad (7)$$

Враховуючі початкові умови $t = 0$, $H = H_0$, на підставі формули (7) визначаємо

$$H^*(p) = \frac{H_0}{p} + \frac{K_2}{p^2} - \frac{KC_n^*(p)}{p}. \quad (8)$$

На підставі формули (8) можна скласти структурну схему з відповідними динамічними ланками.

Приймаючи до уваги залежності (7), (8), запишемо

$$H_0 - H = K \int_0^t C_n(t) dt - K_2 t. \quad (9)$$

$$Q = Q_0 \exp\left[-\left(K \int_0^t C_n(t) dt - K_2 t\right)\right]. \quad (10)$$

Якщо $C_n = C_K = \text{const}$, то на підставі формул (9), (10) визначаємо

$$H = H_0 - (KC_n - K_2)t, \quad (11)$$

$$Q = Q_0 \exp[-(KC_n - K_2)t]. \quad (12)$$

На підставі формул (11), (12) визначаємо час, необхідний для зменшення H від H_0 до H_y або Q від Q_0 до Q_y :

$$t_y = \frac{H_0 - H_y}{KC_n - K_2}, \quad (13)$$

$$t_y = \frac{1}{KC_n - K_2} \ln \frac{Q_0}{Q_y}. \quad (14)$$

Суттєвим фактором, який впливає на ефективність радіокерування, є втрати інформації в об'єкті керування за рахунок дії завод та невизначеності характеристик об'єкта керування [7]. Якщо K_3 — константа швидкості втрат інформації в об'єкті керування, C_K — швидкість зміни кількості інформації з КЧ, то закономірність зміни кількості інформації в ОК в умовах втрат інформації

$$\frac{dI}{dt} = C_K - K_3 I. \quad (15)$$

Інтегрування рівняння (15) в разі $C_K = const$ за початкових умов $t = 0$, $I_0 = 0$ дає наступний результат:

$$I = \frac{C_K}{K_3} [1 - \exp(-K_3 t)]. \quad (16)$$

Оскільки $C_n = dI/dt$, то на підставі рівняння (16) знаходимо

$$C_n = C_K \exp(-K_3 t). \quad (17)$$

Отже, рівняння (2) набуває наступного вигляду

$$\frac{dH}{dt} = -KC_K \exp(-K_3 t). \quad (18)$$

Таким чином, враховано основні ситуації, які виникають в процесі радіокерування рухомими об'єктами.

На підставі рівняння (18) знаходимо:

$$H^*(p) = \frac{H_0}{p} - \frac{KC_K}{p(p + K_3)}. \quad (19)$$

Рівняння (19) дає можливість скласти структурну схему з відповідними динамічними ланками та визначити $H = H(t)$:

$$H = H_0 - \frac{KC_K}{K_3} [1 - \exp(-K_3 t)]. \quad (20)$$

На підставі формули (20) визначимо час, необхідний для зменшення ентропії від H_0 до H_y

$$t_y = \frac{1}{K_3} \ln \frac{KC_K}{KC_K - K_3(H_0 - H_y)}. \quad (21)$$

Аналіз формули (21) показує, що для реалізації процесу керування в умовах втрат інформації необхідно виконати умову

$$H_0 - H_y < \frac{KC_K}{K_3}.$$

Прийmemo до уваги, що досить часто необхідно враховувати потенційні можливості систем радіокерування. Нехай за умови збільшення кількості інформації I величина Q поступово зменшується

та асимптотично наближається до свого потенційно можливого мінімального значення Q_n . Таким чином, $dQ = -K(Q - Q_n) dI$, або

$$\frac{dQ}{dI} = -K(Q - Q_n). \quad (22)$$

Введемо у розгляд різницю об'ємів $Q_p = Q - Q_n$. Тоді на підставі формули (22) знаходимо

$$\frac{dQ_p}{dI} = -KQ_p. \quad (23)$$

Оскільки $C_n = dI/dt$, $H_p = \ln Q_p$, на підставі формули (23) запишемо

$$\frac{dH_p}{dt} = -KC_n. \quad (24)$$

Порівняльний аналіз формул (2), (24) показує, що всі попередні результати залишаються коректними, якщо виконати заміну $H_0 \rightarrow H_{0p}$, $H \rightarrow H_p$, $H_y \rightarrow H_{yp}$.

Встановимо зв'язок між отриманими результатами та характеристиками динамічних ланок, які входять в систему керування. Прийmemo до уваги, що $C_n = dI/dt$, де $I = \ln N$, де N — інформаційна спроможність. В разі аналізу перехідного процесу $N = 1/2\gamma$, де γ — відносна помилка [8, 9]. Таким чином, $C_n = d \ln N/dt$, або

$$C_n = \frac{\dot{N}}{N} = -\frac{\dot{\gamma}}{\gamma}, \quad (25)$$

де $\dot{N} = dN/dt$, $\dot{\gamma} = d\gamma/dt$.

Відповідно до формули (2) можна записати

$$\frac{dH}{dt} = K \frac{\dot{\gamma}}{\gamma}.$$

Нехай об'єкту керування відповідає модель заміщення першого виду першого порядку, тобто передаточна функція об'єкта керування

$$W(p) = \frac{K_0}{Tp + 1}, \quad (26)$$

де K_0 — коефіцієнт передачі, T — постійна часу. Тоді $\gamma = \exp(-\frac{t}{T})$ [9]. На підставі формули (25) знаходимо $C_n = \frac{1}{T}$. Приймаючи до уваги залежність (2), визначаємо

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{K}{T}.$$

На підставі формули (5) запишемо

$$t_y = \frac{T}{K} \ln \frac{Q_0}{Q_y}.$$

Якщо використовується система командного радіокерування, то контролюється різниця $\varepsilon = \varepsilon_c - \varepsilon_p$, де ε_c , ε_p - кути ліній візування цілі та об'єкта керування. В разі аналізу задачі в одній площині відносно кутів маємо

$$t_y = \frac{T}{K} \ln \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_y}.$$

де $\varepsilon_0 = \varepsilon_{c0} - \varepsilon_{p0}$, $\varepsilon_y = \varepsilon_{cy} - \varepsilon_{py}$.

Розглянемо ситуацію, коли за рахунок впливу завад та невизначеності характеристик об'єкта керування спостерігається втрата інформації. Нехай передаточна функція керуючої частини визначається з рівняння (26). Тоді $C_K = 1/T$. На підставі формул (20), (21) знаходимо

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \exp \left\{ -\frac{K}{K_3 T} [1 - \exp(-K_3 t)] \right\},$$

$$t_y = \frac{1}{K_3} \ln \frac{K}{K - K_3 T \ln \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_y}}.$$

Таким чином, на підставі проведеного аналізу встановлено закономірності зменшення ентропії об'єкта керування в результаті надходження керуючої інформації та визначено необхідний час для її зменшення. З іншого боку, відповідно до формули (25), представляється можливим враховувати вплив параметрів динамічних ланок на закономірності зменшення ентропії.

Висновки

На підставі запропонованих динамічних моделей проведено ентропійний аналіз процесу радіокерування рухомими об'єктами, що дало можливість:

1. Встановити залежність між ентропією об'єкта керування та швидкістю надходження керуючої інформації.
2. Визначити час керування, необхідний для зменшення ентропії від початкового до заданого значення.
3. Врахувати потенційні можливості систем радіокерування.
4. Оцінити вплив втрат інформації в об'єкті керування на закономірність зменшення ентропії.
5. Визначити можливість реалізації процесу керування в ситуації, коли втрачається інформація.
6. Встановити зв'язок між ентропійними показниками та характеристиками динамічних ланок.

Перелік посилань

1. Биард Р. У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Рэндал У. Биард, Тимати У. МакЛэйн. – М. : Техносфера. – 2015. – 312 с.
2. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / под. ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Серебрякова. – М. : Физматлит. – 2009. – 556 с.
3. Меркулов В. И. Авиационные системы радиопреупления. Том 1. Принципы построения систем радиопреупления. Основы синтеза и анализа / А. И. Коначенков, В. И. Меркулов. – М. : Радиотехника. – 2003. – 192 с.
4. Коган И. М. Теория информации и проблемы ближней радиолокации. / И. М. Коган. – М. : Сов. радио. – 1968. – 144 с.
5. Денисов А. А. Информационные основы управления. / А. А. Денисов. – Л. : Энергоатомиздат. – 1983. – 72 с.
6. Попович М. Г. Теория автоматического керування / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – К. : Либідь. – 2007. – 656 с.
7. Красовский А. А. Динамика непрерывных самонастраивающихся систем / А. А. Красовский. – М. : Физматгиз. – 1963. – 468 с.
8. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. / П. В. Новицкий. – М. : Энергия. – 1968. – 348 с.
9. Ацюковский В. А. Построение систем связи комплексов оборудования летательных аппаратов. / В. А. Ацюковский. – М. : Сов. радио. – 1974. – 240 с.

References

- [1] Beard R. W. and McLain T. W. (2012) *Small unmanned aircraft: Theory and practice*, Princeton university press, 320 p., DOI: 10.1515/9781400840601
- [2] Krasil'shchikova M. N. and Serebryakova G. G (2009) *Sovremennye informatsionnye tekhnologii v zadachakh navigatsii i navedeniya bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov* [Modern information technologies in the navigation and guidance problems of maneuverable drones]. Moscow, Fizmatlit Publ., 556 p.
- [3] Merkulov V. I. and Konashchenkov A. I. (2003) *Aviatsionnye sistemy radiopreupleniya. Kn. 1. Printsipy postroeniya sistem radiopreupleniya. Osnovy sinteza i analiza* [Aircraft radio systems, Vol. 1: Principles of the radio control systems. Basics of synthesis and analysis]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 192 p.
- [4] Kogan I. M (1968) *Teoriya informatsii i problemy blizhnei radiolokatsii* [Information Theory and problems of short-range radar]. Moscow, Sovetskoie radio Publ., 144 p.
- [5] Denisov A. A. (1983) *Informatsionnye osnovy upravleniya* [Information Control basics]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 72 p.
- [6] Popovych M. H. and Kovalchuk O. V. (2007) *Teoriia avtomatichnoho keruvannia* [Theory of automatic control]. Kyiv, Lybid Publ., 656 p.

- [7] Krasovskii A. A. (1963) *Dinamika nepreryvnykh samonastroyayushchikhsya system* [The dynamics of continuous adaptive systems]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 468 p.
- [8] Novitskiy P. V. (1968) *Osnovy informatsionnoy teorii izmeritelnykh ustroystv* [Fundamentals of measurement devices information theory]. Moscow, Energiya Publ., 348 p.
- [9] Atsyukovskiy V. A. (1974) *Postroenie sistem svyazi kompleksov oborudovaniya letatelnykh apparatov* [Building a communications system for aircraft equipment]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 240 p.

Энтропийный анализ процесса радиоуправления подвижными объектами

Бычковский В. А., Реутская Ю. Ю.

На основании макроскопического подхода к анализу процесса радиоуправления установлено соотношение между скоростью изменения энтропии объекта управления и скоростью поступления управляющей информации. Выполнена декомпозиция системы радиоуправления, учтены информационные связи между объектом и управляющей частью, установлено необходимое время для уменьшения энтропии до предусмотренного значения. Проанализирована ситуация, которая возникает в условиях увеличения энтропии неуправляемого объекта. Установлено условие уменьшения энтропии в случае поступления управляющей информации и необходимое время управления. Проанализирована ситуация, когда известны потенциальные возможности системы радиоуправления. Рассмотрено влияние потерь информации в объекте управления на закономерность изменения энтропии. Установлено необходимое время управления в условиях потерь информации. Определена возможность реализации процесса управления в условиях потерь информации.

Ключевые слова: радиоуправление; энтропия; информация

The entropy analysis of moving objects radio control process

Bychkovskiy, V. O., Reutska, Yu. Yu.

Introduction. The processes of mobile objects control are deploying in space and time on the basis of current scientific concepts. They are inseparably connected with the processes of transformation of matter, energy and information. Therefore the feasibility of using the information theory mathematical apparatus to analyze of management processes in general, and the mobile objects

radio control processes becomes clear. The static approach to this problem is based on determining the amount of information that must be entered in the control loop to reduce the entropy of the control object from a starting value to a final value. The entropy determines the accuracy of the control. The dynamic control process remains hidden. It does not enable to establish the necessary control time, the laws entropy reduce and the relationship between the main indicators of the control process.

Problem statement. Radio control systems have one thing; the entropy of the control object and control process is reduced because the control information supplied. Entropy is the objective characteristic of control precision. The information consists of the initial information and the operation information. The initial information is a set of pre-collected data about the properties of the control object, the disturbance and other factors. Working information is extracted in the control process. It is necessary to create the control process dynamic model which reveals the patterns of change in the control object entropy both in the absence and presence of control information. It should be appreciated that as the law of entropy reduction and the amount of control information depend on the organization of control process and the nature of information exchange between the control part and the control object.

Theoretical results. The radio control system decomposition is made. The information communications between the object and the control section are considered. The time needed to reduce the entropy to the prescribed value is set. The situation that occurs in conditions of increasing entropy unmanaged object is analyzed. Conditions entropy reduction in the event of control information and necessary control time are mounted. A situation where the known the radio control system potential is analyzed. The loss of information impact in the control object on the change in entropy pattern is considered. The needed control time in a loss of information is established. The possibility of implementing the control process in a loss of information defined.

Conclusion. Based on the proposed dynamic models entropy analysis of radio control process is executed. The relationship between the entropy of the control object and the speed of control information entry is installed. The necessary control time to reduce the entropy is determined. The radio control systems potential possibilities are took into account. The impact of information loss in control object to reduce the entropy is studied. The effect of feedback between the control object and control part on the process dynamics is established. These results provide a new level of radio control process analysis of moving objects.

Key words: radio control; entropy; informational losses; information