



UDC 631.85.

N.R.YUSUPBEKOV, SH.M.GULYAMOV (TGTU),
M.B.ZAYNUTDINOVA, N.ZH.KHOJIYEVA (TUIT)

ANALYSIS OF INFORMATION CHARACTERISTICS OBJECTS OF CHEMICAL TECHNOLOGY

Кимё-технология тизимларининг технологик схемаларини такомиллаштириши даражасини умумлаштирилган бахоларини қиритиши мақсадида кимёвий-технология тизимларининг асосий ахборот хусусиятлари ушбу тизимлар тасодифий функцияларининг чиқиши координаталарига статистик ишлов бериши натижалари бўйича аниқланиши мумкинлиги қўриб чиқилган. Кимёвий корхонада моноэтаноламинли тозалаш бўлими фаолиятининг термодинамик тахлил мисолида кимёвий технология объектларининг хисоблаш усуллари баён этилган.

Калит сўзлар: энтропия, ахборот хажми, моноэтаноламинли тозалаш, дифференциал энтропия, спектрал зичлик.

С целью введения обобщенных оценок степени совершенства технологических схем химико-технологических систем рассмотрены основные информационные характеристики химико-технологических систем, которые могут быть определены по результатам статистической обработки случайных функций выходных координат объектов. Изложена методика расчёта информационных характеристик объектов химической технологии на примере термо-динамического анализа функционирования отделения моноэтаноламиновой очистки газа на химическом предприятии.

Ключевые слова: энтропия, количество информации, моноэтаноламиновая очистка, дифференциальная энтропия, спектральная плотность.

In order to introduce generalized assessments of the degree of perfection of technological schemes of chemical-technological systems, the basic information characteristics of chemical-technological systems that can be determined from the statistical processing of random functions of the output coordinates of these systems are considered. The methods of calculation information characteristics objects Chemical Technology on thermodynamic analysis operation example monoethanolamine separating gas purification at a chemical plant.

Keywords: entropy, amount of information, monoethanolamine purification, differential entropy, spectral density.

С помощью обобщенных информационных оценок степени совершенства технологических структур объектов химической технологии обеспечивается наиболее общий подход к количественному и качественному исследованию сложных технологических процессов и производств. Объект химической технологии может рассматриваться как информационная система, выполняющая преобразование

$$Y(y_1, y_2, \dots, y_m) \rightarrow X(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — вектор случайных функций времени, характеризующий выходные координаты объекта; $Y(y_1, y_2, \dots, y_m)$ — вектор случайных функций времени, характеризующий внешние и внутренние возмущения и управляющие воздействия.

Вид этого в общем случае нелинейного преобразования зависит от физико-химических особенностей процесса, технологической структуры и связей, накладываемых на процесс управления [1,2]. Получение аналитического вида связи входного и выходного векторов, когда рассматривается процесс, выходящий за пределы одного аппарата, в большинстве практических случаев затруднено даже с помощью математического моделирования. В то же время эти данные являются исходными для проектирования, управления и оптимизации химико-технологических процессов (ХТП) и производств. Решение этой задачи во многом облегчает

знание информационных характеристик действующих химических производств.

Основными информационными характеристиками ХТП являются:

- *энтропия выходного вектора* $-X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ как мера возможных отклонений процесса от заданного режима, т. е. критерий качества ведения процесса и его организованности;

- *скорость и знак изменения энтропии* во времени в стационарном и нестационарном режимах, протекания технологического процесса с управлением и без него как мера его устойчивости и обобщенный критерий оценки качества управления;

- *количество информации*, которое несут выходные сигналы: в любом из возможных режимов как мера сложности объекта химической технологии и основа для расчета системы управления;

- *пропускная способность объекта* по каналам возмущающих и управляющих воздействий, позволяющая обосновать выбор средств и схемы автоматизации [3].

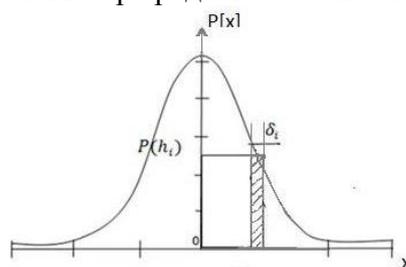


Рисунок 1. Физическое представление выходной координаты технологического процесса.

Обратимся к анализу информационных характеристик объектов химической технологии на примере отделения моноэтаноламиновой очистки химического производства. Любая из выходных координат процесса физически представляет собой сигнал, несущий за n отсчетов во времени информацию о состоянии объекта (рисунок 1).

$$I = -n \sum_{i=1}^n P(h_i) \delta \log_2 [P(h_i) \delta]. \quad (2)$$

Этот сигнал снимает неопределенность знаний об объекте на величину ΔH энтропии, численно равную количеству полученной информации $\Delta H = 1$. Для случая n -независимых координат системы имеет место

$$H = \sum_{i=1}^n H_i. \quad (3)$$

Если число уровней квантования сигнала достаточно велико, то

$$I = -n \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \log_2 [P(x) \delta_x] dx \quad (4)$$

и поскольку

$$I = nH,$$

то для энтропии квантованного сигнала

$$H = - \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \log_2 [P(x) \delta_x] dx. \quad (5)$$

Большинство процессов химической технологии протекает относительно медленно (исключая точки критических режимов), т. е. их сигналы имеют непрерывный характер со смещением в низкочастотную часть спектра. В этом случае нельзя отдать предпочтение какому-либо из критериев квантования по уровню. Поэтому обработку записей реализаций, полученных в результате промышленного эксперимента, удобнее вести с квантованием только по времени.

Очевидно, переход от дискретной случайной величины к непрерывной возможен путем уменьшения шага квантования до 0 при неограниченном росте числа возможных значений квантованного сигнала, поскольку

$$m = \left[\frac{2X_{max}}{\delta_x} + 1 \right], m \rightarrow \infty \text{ при } \delta \rightarrow 0 \quad (6)$$

Прямой предельный переход при $\delta_x \rightarrow 0$ по формуле (5) приводит к значению энтропии процесса, равному бесконечности. Тем не менее для непрерывных случайных величин удастся получить ряд соотношений, позволяющих успешно изучать информационные свойства как не-

прерывных, и дискретных сигналов.

После несложных преобразований формулу (5) можно переписать в виде

$$H(x) = - \left[\int_{-\infty}^{\infty} P(x) \log_2 P(x) dx + \log_2 \delta_x \right]. \quad (7)$$

Первое слагаемое зависит только от вида распределения, т. е. все квантованные сигналы с одним и тем же распределением вероятностей появления их уровней могут иметь различные энтропии только за счет различных величин шагов квантования.

Рассмотренный интеграл носит название дифференциальной энтропии

$$h_x = \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \log_2 P(x) dx, \quad (8)$$

$$H(x) = h(x) - \log_2 \delta_x. \quad (9)$$

При наложении ограничений на точность измерения вносится дополнительная неопределенность за счет уменьшения различных градаций сигнала $H_y(x)$:

$$H_y(x) = h_y(x) - \log_2 \delta_x \quad (10)$$

Очевидно, количество информации в $Y(t)$ равно количеству информации источника $X(t)$ за вычетом потери в разлителе. Соответствующие энтропии будут связаны

$$H(y) = H(x) - H_y(x)$$

или на основании (9) и (10)

$$H_y = h(x) - h_y(x) \quad (11)$$

или в развернутом виде

$$H(y) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \log_2 P(x) dx + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x,y) \log_2 \left[\frac{P(x,y)}{P(y)} \right] dx dy =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x,y) \log_2 P(x) dx dy + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x,y) \log_2 \left[\frac{P(x,y)}{P(y)} \right] dy;$$

поскольку

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(x,y) dy = P(x)$$

Окончательно имеем

$$H(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x,y) \log_2 \left[\frac{P(x,y)}{P(x)P(y)} \right] dx dy. \quad (12)$$

Соотношение (12), определяющее энтропию источника при заданной точности измерения сигнала, не зависит от шага квантования, следовательно, оно будет справедливо и для $\delta_x = 0$.

Количество информации, выдаваемое источником непрерывных сигналов при ограниченной точности их измерения, выразится следующим образом:

$$I = n[h(x) - h_y(x)]. \quad (13)$$

Информационно-управляющие системы химических производств в реальных условиях чаще всего имеют дело с коррелированными сигналами, близкими по характеру распределения к нормальному закону, поэтому представляет интерес получение выражений для определения информационных характеристик нормально распределенных коррелированных сигналов. Для некоррелированного нормально распределенного сигнала (одномерная плотность вероятности)

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \cdot e^{-x^2/2\sigma_x^2}$$

после интегрирования в

$$h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \log_2 P(x) dx$$

дает значение дифференциальной энтропии

$$h(x) = \log_2 \sigma_x \sqrt{2\pi} e. \quad (14)$$

Для коррелированного сигнала

$$h(x) = \log_2 \left[\sigma_x \sqrt{2\pi e(1-r^2)} \right], \quad (15)$$

где r - коэффициент корреляции [2].

Значение энтропии при заданной средней квадратичной ошибке различителя σ_p на выходе источника может быть найдено

$$H(y) = h(x) - \max h_y(x)$$

$$\max h_y(x) = \log_2 \sigma_p \sqrt{2\pi} e$$

Тогда

$$H(y) = \log_2 [\sigma_x \sqrt{2\pi e(1-r^2)}] - \log_2 \sigma_p \sqrt{2\pi} e = \log_2 \frac{\sigma_x}{\sigma_p} \sqrt{1-r^2}. \quad (16)$$

Общее количество информации с объекта для независимых координат выразится

$$I = h \sum_{i=1}^m H_i(y). \quad (17)$$

Для скорости изменения энтропии

$$v(t, \tau) = \frac{\Delta H_T(x, t, \tau)}{T}, \quad (18)$$

где ΔH_T —приращение энтропии за интервал времени $T = (t - \tau)$.

В частном случае, если производная энтропии по времени в системе, не подверженной действию шумов, все время отрицательна, то имеет место общая энтропийная устойчивость

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} = - \frac{\Delta d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \log_2 P(x) dx.$$

Если \dot{H} знакопеременна, но абсолютное значение энтропии процесса ограничено некоторым конечным числом N , то процесс будет нерасходящимся.

Эффективность управления при энтропии неуправляемого процесса $H_0(t, \tau)$ может быть оценена отношением

$$\eta(t, \tau) = \frac{H_0(t, \tau) - H_1(t, \tau)}{H_0(t, \tau)}. \quad (19)$$

Процент содержания углекислоты в очищенном газе непрерывно регистрируется на диаграммной ленте. Таким образом, в преобразовании (1) мы располагаем записями реализаций $X(x_1)$ —определяющей выходной координаты процесса (рисунок 2).

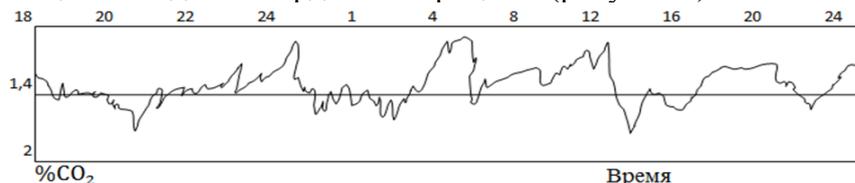


Рисунок 2. Запись реализации выходного сигнала технологического процесса.

Результаты приближенной оценки получены для стационарного режима процесса, не возмущенного резкими колебаниями нагрузки (расхода газа).

Приближенная оценка первых моментов распределения реализаций выходной координаты для двух выборок продолжительностью 1 сутки каждая, по рекомендациям, изложенным в [4], при условии нормального распределения, дает значение математического ожидания дисперсии и энтропии:

- для первой выборки: $m_{x_1} = 1,29\%$; $\sigma_{x_1} = 0,39\%$.

- для второй выборки: $m_{x_2} = 1,56\%$; $\sigma_{x_2} = 0,45\%$.

Технологическая норма параметра составляет 1,4%.

По результатам приближенной оценки можно заключить:

- неуправляемый процесс энтропийно неустойчив, $\frac{dH}{dt} > 0$, $\sigma_{x_2} > \sigma_{x_1}$, т. е. дезорганизуется во времени;

- количественно мера дезорганизации процесса оценивается положительным

необратимым приращением энтропии $\Delta H = \log_2 \frac{\sigma_{x_2}}{\sigma_{x_1}} = 0,06, \text{ усл. ед./сутки}$ искоростью изменения энтропии $\frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{0,06}{24} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ усл. ед./ч};$

- в пределах выбранных временных интервалов процесс является нерасходящимся.

Для уточненного расчета значений энтропии и количества информации необходимо знать корреляционную функцию и спектральную плотность процесса. Эти данные получены в результате обработки записей реализаций с доверительной вероятностью ($P = 0,9$).

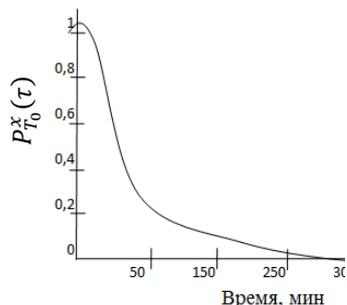


Рисунок 3. Корреляционная функция выходного сигнала технологического процесса.

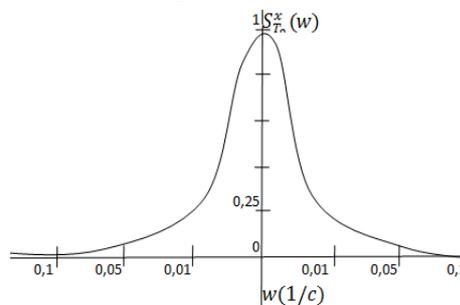


Рисунок 4. Спектральная плотность выходного сигнала технологического процесса.

$$\rho|\tau| = 0,34(30,3e^{-0,013|\tau|}) - e^{-0,400|\tau|}, \tag{20}$$

$$S(\omega) = \frac{1}{1,49 \cdot 10^3 \omega^4 + 0,23 \cdot 10^3 \omega^2 + 1} [1/c^2] \tag{21}$$

Уточненные статистические характеристики процесса рис.3. и рис.4. позволяют произвести расчет информационных характеристик системы для квантованного во времени выходного сигнала.

График спектральной плотности выходного сигнала технологического процесса смещен в низкочастотную область и практически не содержит частот выше $F = 1/2T$. Поэтому, согласно теореме Котельникова, интервал квантования по времени может быть взят $\Delta t = \frac{1}{2F} = 0,5 \text{ с.}$

Для стационарного режима процесса по выражению к определим значение энтропии на один отсчет, информационную емкость выходного сигнала по (17) и избыточность, вызванную наличием корреляции

$$R = 1 - \frac{H}{H_{max}} = 1 - \frac{H(y)}{H(y)_{max}} \tag{22}$$

где $H(y)$ – энтропия сигнала при $R=0$.

В выражение энтропии сигнала при ограниченной точности измерения входит погрешность измерения сигнала в разлителе. Точность измерения выходной величины обусловлена погрешностью датчика и классом точности вторичного прибора. При общей ошибке измерения $\Delta = 2\%$, $\sigma_x = 0,45$, и шкале прибора $l=3$ имем $\sigma_p = 3 \cdot 0,02 = 0,06$.

Коэффициент корреляции определится из (20) для $\text{for } \tau = \Delta t$ интервала квантования по времени. Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Результаты расчёта информационных характеристик МЭАО газа.

Коэффициент корреляции R	Энтропия на один отсчёт (дв.ед.) H	Количество информации дв.ед./мин. S	Избыточность R
Стационарный режим			
0,89	5,12	604	0,11
Нестационарный режим			
0,81	18,3	2180	0,18

По результатам расчетов можно заключить, что процесс характеризуется большой остаточной неопределенностью. Сильная корреляция и избыточность создают хорошие предпосылки для стабилизации процесса активным управлением. Значением информационной

емкости сигнала в нестационарном режиме определяется нижняя граница пропускной способности контура управления.

Заключение.

Информационные характеристики химико-технологических процессов и систем могут быть определены по результатам статистической обработки случайных функций выходных координат технологических объектов.

Методами теории информации можно оценить качество работы сложного технологического комплекса в целом, исследовать характер неуправляемого протекания процесса и сформулировать требования пропускной способности систем управления исследуемыми технологическими объектами.

References:

1. V. V. Kafarov, *Metody kibernetiki v himii i himicheskoy tehnologii*. Izd-vo "Himiya", Moskva 1986-236 s.
2. N.R. Yusupbekov, R.A. Aliev, R.R. Aliev, A.N. Yusupbekov, *Intellektual'ny'e sistemy upravleniya i prinyatiya resheniy, Gosudarstvennoe nauchnoe izdatel'stvo. «Uzbekistonmilliyе nciklopediyasi»* Tashkent, 2014 - 490s.
3. *Osnovy avtomatiki i tehniceskoy kibernetiki*, «Gose nergoizdat», 1966.
4. E. L. Ickovich. *Statisticheskie metody v obrabotke promyshlennogo e`ksperimenta*. Izd-vo «E`nergiya», Moskva 2006. –232 s.
5. Brodnyanskiy V.M., Fratshe V., Mihalsk K., *Eksergeticheskiy metod i ego prilozheniya*, «E`nergoizdat», Moskva, 2008-267s.
6. Sicintyos S., Jeronski J. *Energy Optimization in Process Systems*, Elsevier, LTD, UK, London, 2009-348p.
7. Devid Stokill, *E`nergoe`ffektivnost' v pererabatyvayush'ey promyshlennosti. Rukovodstvo pol'zovatelya po stabil'noy e`nergoe`ffektivnosti*, Emirgon, 2013-50 s.
8. Atel'kin S.A., Martinash K., Cirlin A.M. *Optimal'ny'e processy' v neobratimy'h termodinamicheskikh i mikroek`onomicheskikh sistemah*, «Avtomatika i telemehanika», №4, 2002-s. 3-25.
9. Bazarov I.P. *Termodinamika*, Uchebnik, 5-oe izd. SP, Lan', 2010-377 s.
10. Balunov I.P., Maykov V.P. *E`ntropiya i informatsiya v teorii rektifikatsii*, *Izvestiya vuzov, seriya «Himiya i himicheskaya tehnologiya»*, M.46, №9, 2003-s.54.
11. Brodnyanskiy V.M., Fratshe V., Mihalek K., *E`nergeticheskiy metod i ego prilozheniya*, Moskva, E`nergoatomizdat, 1988.
12. Glenedorf P., Prigojin I. *Termodinamicheskaya teoriya struktury, ustoychivosti i fluktuatsiy*, Moskva, Mir, 1993.
13. Mironova V., A., Amel'kin S., A., Ciryain A., M., *Matematicheskie metody' termodinamiki pri konechnom vremeni*, Moskva, Himiya, 2000.
14. Priyujin I., Kondepudi D., *Sovermennaya termodinamika*, Moskva, Mir, 2002.
15. Serafimov L.A., CHelyuskina T.V., Mavastkulova P.O. *Vy'bor optimal'ny'h tehnologicheskikh shem retifikatsii mnogokomponentny'h smesey, Teoreticheskie osnovy' himicheskoy tehnologii*, tom 49, №1, 2016-s.44-53.
16. Sofieva YU.N., Cirlin A.M. *Uslovnaya optimizatsiya: metody' i zadachi*, Moskva, URSS, 2003-144 s.
17. Cirlin A.M. *Optimal'ny'e v neobratimoy termodinamike i e`konomie*, Moskva, Fizmatlit, 2002.
18. Cirlin A.M. *Matematicheskie modeli i optimal'ny'e processy' v makrosistemah*, Moskva, Nauka, 2006-500 s.
19. Cirlin A.M. *Ksloviya optimal'nosti usredne'nny'h zadach s nestacionarnymi parametrami*, *Doklady' RAN*, №2, 2000-s.177-179.
20. Cirlin A.M. *Optimal'ny'e processy' i upravlenie v neobratimoy mikroek`onomike*, *Avtomatika i mehanika*, №5, 2001.

Yusupbekov Nadyrbek Rustambekovich - Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation of Production Processes of TSTU;

Gulyamov Shukhrat Manapovich - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation of Production Processes of TSTU;

Zainutdinova Mastura Bahadirovna - candidate of technical sciences, associate professor of the department "Information Technology" TUIT;

Tel: +998903465628 (m.), E-mail: dilfuza65@gmail.com .;

Khozhiyeva Nasiba Zhumabaevna - applicant of the department "System and applied programming" TUIT;

Tel: +998946833837 (m.), E-mail: nhojjeva8@gmail.com.