

Теоретические аспекты анализа структурных сдвигов при исследовании процессов динамики сложных технических и социально-экономических систем



О. В. Афанасьева,
к. т. н., доцент, кафедра
системного анализа и управления,
экономический факультет,
Санкт-Петербургский горный
университет
ovaf72@gmail.com



С. В. Колесниченко,
д. т. н., доцент, зав. кафедрой,
кафедра математического
моделирования и прикладной
информатики, Государственный
университет морского и речного флота
им. адмирала С. О. Макарова
serjkop@yandex.ru



И. М. Новожилов,
к. т. н., доцент, кафедра
автоматики и процессов управления,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова
(Ленина)
novozhilovim@list.ru

г. Санкт-Петербург, Россия

Исследованы подходы формализации нелинейных уравнений динамики сложных технических систем и социально-экономических систем. Рассмотрен алгоритм построения кусочно-линейной модели динамики сложной системы (объекта). Обосновано применение алгоритма для определения наличия структурных сдвигов исследуемого процесса, а также оценки временных параметров разбиения исходного тренда. Осуществлена проверка работоспособности алгоритма по переходу от единого уравнения нелинейного тренда к кусочно-линейной модели. Предложенные алгоритмы являются дальнейшим развитием подходов по моделированию тенденции временных рядов при наличии структурных изменений на основе статистических тестов Г. Чоу и Д. Гуйарати.

Ключевые слова: сложные объекты и системы, статистический анализ, управление, моделирование, тренд, структурные изменения, эффективность, точность.

Основой комплексного исследования деятельности сложных систем и объектов является анализ их показателей и моделей функционирования [1]. Наиболее часто динамика основных показателей исследуется на основе анализа временных рядов [1-3].

Важнейшей задачей исследования временных рядов является определение (идентификация) составляющих тренда: собственно трендовой составляющей, циклической (сезонной) и случайной. Кроме того, помимо циклических и сезонных колебаний, важно четко выделять единовременные изменения характера тенденции временного ряда, обусловленные действием факторов или совокупности внешней среды факторов (например, структурными изменениями в экономике) [1, 4]. В этом случае, начиная с некоторого момента t^* , происходит изменение характера динамики исследуемого показателя (процесса), что приводит к изменению параметров тенденции, описывающей эту динамику [1, 5]. Возможный вариант данной ситуации представлен на рис. 1.

Момент (период) времени t^* сопровождается значительными изменениями ряда факторов, оказывающих существенное воздействие на изучаемый показатель y_t . Чаще всего эти изменения вызваны изменениями факторов внешней среды (изменениями общеэкономической ситуации, факторами глобального характера и др.), приведшими к изменению структуры исследуемого процесса. Если исследуемый временной ряд включает в себя соответствующий момент (период) времени, то одной из задач его изучения становится выяснение вопроса о том, значимо ли повлияли общие структурные изменения на характер этой тенденции [5, 6].

Если это влияние значимо, то для моделирования тенденции исследуемого временного ряда следует либо сменить форму модели (подобрать из возможных нелинейных), либо использовать кусочно-линейные регрессионные модели, т. е. разделить исходную совокупность выборки (до момента t^* и после него) и построить отдельно по каждой уравнения линейной регрессии (на рис. 1 этим уравнениям соответствуют прямые 1 и 2). Если же структурные изменения незна-

чительно повлияли на характер тенденции исходного ряда y_t , то ее можно описать (аппроксимировать) с помощью единого для всей совокупности данных уравнения тренда (на рис. 1 этому уравнению соответствует прямая 3).

Каждый из упомянутых подходов имеет свои сильные и слабые стороны. При построении кусочно-линейной модели происходит снижение остаточной суммы квадратов (ESS) и остаточной дисперсии в целом по сравнению с единым для всей совокупности уравнением тренда. Однако разделение исходной совокупности на две части ведет к потере числа наблюдений и, следовательно, к снижению числа степеней свободы в каждом уравнении кусочно-линейной регрессии. Построение единого для всей совокупности уравнения тренда, напротив, позволяет сохранить число наблюдений n исходной совокупности, однако остаточная дисперсия по этому уравнению будет значительно больше по сравнению с кусочно-линейной моделью [1, 7].

Очевидно, что выбор одной из двух моделей (кусочно-линейной или единого уравнения тренда) будет зависеть от соотношения между данными возможного снижения остаточной дисперсии и потерей числа степеней свободы при переходе от единого уравнения регрессии к кусочно-линейной модели. В качестве одного из подходов для оценки данного соотношения предлагается использовать статистический тест Г. Чоу [1, 8].

Использование данного теста предполагает расчет параметров уравнений трендов, графики которых изображены на рис. 1 прямыми 1, 2 и 3.

Основные обозначения для проведения последующего дисперсионного анализа представлены в табл. 1.

Для исследования структурной стабильности тенденции изучаемого временного ряда выдвигается основная гипотеза H_0 .

Остаточная сумма квадратов по кусочно-линейной модели определяется как сумма ESS_1 и ESS_2 :

$$ESS_k = ESS_1 + ESS_2. \quad (1)$$

Соответствующее число степеней свободы составит:

$$(n_1 - m_1) + (n_2 - m_2) = (n - m_1 - m_2). \quad (2)$$

Тогда величину сокращения остаточной дисперсии при переходе от единого уравнения тренда к кусочно-

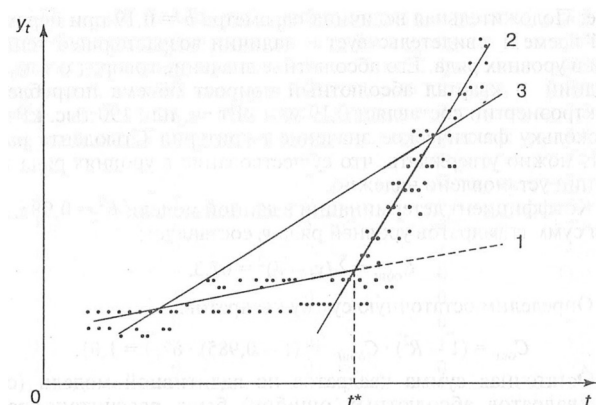


Рис. 1. Изменение характера тенденции временного ряда

линейной модели можно определить следующим образом:

$$\Delta ESS = ESS_3 - ESS_{кл}. \quad (3)$$

Число степеней свободы, соответствующее $\Delta ESS_{ост}$, с учетом соотношения (2) будет равно:

$$n - m_3 - (n - m_1 - m_2) = m_1 + m_2 - m_3.$$

Далее в соответствии с предложенной Г. Чоу методикой определяется эмпирическое значение критерия Фишера ($F_{эмп}$):

$$F_{эмп} = \frac{D_{\Delta}}{D_{кл}} \cdot \frac{\frac{\Delta ESS}{m_1 + m_2 - m_3}}{\frac{ESS_{кл}}{n - m_1 - m_2}}. \quad (4)$$

Найденное значение $F_{эмп}$ сравнивают с критическим (табличным), полученным по таблицам распределения Фишера для уровня значимости α и числа степеней свободы $(m_1 + m_2 - m_3)$ и $(n - m_1 - m_2)$.

Если $F_{эмп} > F_{табл}$, то гипотеза о структурной стабильности тенденции (H_0) отклоняется, а влияние структурных изменений на динамику исследуемого показателя (явление или процесса) признается статистически значимым. В этом случае дальнейшее моделирование процесса (тенденции) целесообразно осуществлять с помощью кусочно-линейной модели. Если $F_{эмп} < F_{табл}$, то нет оснований отклонять гипотезу о структурной стабильности тенденции; ее моделирование можно и следует осуществлять с помощью единого (исходного) уравнения тренда.

Таблица 1

Условия формирования и оценки параметров линеаризуемого тренда

№ уравнения	Вид уравнения	Число наблюдений	Остаточная сумма квадратов	Число параметров в уравнении	Число степеней свободы
Кусочно-линейная модель					
(1)	$y^1 = a_1 + b_1 t$	n_1	ESS_1	m_1	$n_1 - m_1$
(2)	$y^2 = a_2 + b_2 t$	n_2	ESS_2	m_2	$n_2 - m_2$
Уравнение тренда по всей исследуемой совокупности					
(3)	$y^3 = a_3 + b_3 t$	$n = n_1 + n_2$	ESS_3	m_3	$n - m_3$

Особенности применения статистического теста Чоу

1. Если число параметров во всех уравнениях одинаково и равно m , то формула (4) упрощается:

$$F_{\text{эмп}} = \frac{D_{\Delta}}{D_{\text{кл}}} \cdot \frac{\frac{\Delta \text{ESS}}{m}}{\frac{\text{ESS}_{\text{кл}}}{n-2m}}.$$

2. Тест Чоу позволяет сделать вывод о наличии или отсутствии структурной стабильности в изучаемом временном ряду. Если $F_{\text{эмп}} < F_{\text{табл}}$, то это также означает, что уравнения (1) и (2) описывают одно и ту же тенденцию, а различия параметров моделей a_1, a_2 и b_1, b_2 статистически незначимы.
3. Применение теста Чоу предполагает соблюдение предпосылок о нормальном распределении остат-

ков в уравнениях (1) и (2), а также независимость их распределений.

Если гипотеза о структурной стабильности тенденции ряда y_t отклоняется, дальнейший анализ может заключаться в исследовании вопроса о причинах этих структурных различий и более детальном изучении характера изменения тенденции. В принятых обозначениях указанные причины обуславливают различия оценок параметров уравнений (1) и (2).

С целью проверки работоспособности математического аппарата описанного подхода исследовались данные динамики грузовых отправок предприятиями минерально-сырьевого комплекса (Δy) в Северо-Западном регионе РФ за 2017 г. (табл. 2).

Исследуемая совокупность разделена на две равнонаполненные выборки. По данным исходного и двух образованных временных рядов проведен корреляционно-регрессионный анализ исходного и

Таблица 2

Данные динамики грузовых отправок предприятиями минерально-сырьевого комплекса в Северо-Западном регионе РФ с января по сентябрь 2017 г., (тыс. т-км)

№ наблюдения	t	Δy	Выборка для уравнения (1)	Выборка для уравнения (2)	ty	t^2	$Y_{\text{теор}}$	$(Y_{\text{теор}} - Y_i)^2$
1	1	0,19	0,19		0,19	1	-0,08	0,073
2	2	0,25	0,25		0,5	4	-0,03	0,080
3	3	0,18	0,18		0,54	9	0,01	0,027
4	4	0,29	0,29		1,16	16	0,06	0,052
5	5	0,24	0,24		1,2	25	0,11	0,017
6	6	0,27	0,27		1,62	36	0,16	0,013
7	7	0,26	0,26		1,82	49	0,20	0,003
8	8	0,29	0,29		2,32	64	0,25	0,002
9	9	0,31	0,31		2,79	81	0,30	0,000
10	10	0,41	0,41		4,1	100	0,34	0,004
11	11	0,42	0,42		4,62	121	0,39	0,001
12	12	0,37	0,37		4,44	144	0,44	0,005
13	13	0,45	0,45		5,85	169	0,49	0,001
14	14	0,37	0,37		5,18	196	0,53	0,026
15	15	0,40	0,40		6	225	0,58	0,032
16	16	0,48	0,48		7,68	256	0,63	0,021
17	17	0,51	0,51		8,67	289	0,67	0,027
18	18	0,47		0,47	8,46	324	0,72	0,063
19	19	0,51		0,51	9,69	361	0,77	0,066
20	20	0,49		0,49	9,8	400	0,81	0,105
21	21	0,54		0,54	11,34	441	0,86	0,103
22	22	0,62		0,62	13,64	484	0,91	0,083
23	23	0,78		0,78	17,94	529	0,96	0,031
24	24	0,74		0,74	17,76	576	1,00	0,069
25	25	0,73		0,73	18,25	625	1,05	0,102
26	26	0,94		0,94	24,44	676	1,10	0,025
27	27	0,93		0,93	25,11	729	1,14	0,046
28	28	1,16		1,16	32,48	784	1,19	0,001
29	29	1,25		1,25	36,25	841	1,24	0,000
30	30	1,41		1,41	42,3	900	1,28	0,016
31	31	1,56		1,56	48,36	961	1,33	0,052
32	32	1,79		1,79	57,28	1024	1,38	0,169
33	33	2,01		2,01	66,33	1089	1,43	0,341
34	34	2,07		2,07	70,38	1156	1,47	0,357
Сумма	595,0	23,97	5,79	18,45	568,490	13685,000		2,013
Среднее	17,5	0,69	0,32	1,091	16,720	402,500		

Таблица 3

Сводная таблица данных корреляционно-регрессионного анализа по исходному временному ряду и выборкам (1) и (2)

№ уравнения	Вид уравнения (параметры)		Число наблюдений	ESS	Число параметров	Число степеней свободы
	a	b			m_i	$n_i - m_i$
Кусочно-линейная модель						
(1)	0,170	0,018	17	0,02346	2	15
(2)	−1,606	0,102	17	0,3501	2	15
Общее уравнение тренда						
(3)	−0,126	0,047	34	2,013	2	32

кусочно-линейных уравнений динамики исследуемого показателя функционирования предприятий отрасли (табл. 3).

В условиях рассмотренного примера расчетное значение критерия Фишера ($F_{\text{эмп}}$) составляет 63,82 а табличное ($F_{\text{табл}}$) 3,316. Существенное различие указанных значений критерия свидетельствуют о структурной нестабильности тенденции исследуемых данных (гипотеза H_0 отклоняется), а, следовательно, влияние структурных изменений на динамику исследуемого показателя признается статистически значимым. Указанные обстоятельства позволяют модифицировать (уточнить или заменить) исходные модели динамики исследуемого транспортного процесса, что в свою очередь позволит использовать при планировании (или бизнес-планировании) процессов производственной деятельности транспортных предприятий использовать более адекватные модели, а, следовательно, получать более точные оценки прогноза производственных показателей.

С другой стороны более точная формализация структурных сдвигов позволяет своевременно производить реконфигурацию производственных процессов, оптимально использовать имеющиеся производственные фонды, что в конечном итоге позволит снизить издержки перевозок и повысить прибыль транспортной и перерабатывающей отраслей страны.

Кроме описанного выше подхода по замене исходного тренда кусочно-линейными моделями возможно использования метода, основанного на включении в модель регрессии исследуемого процесса фиктивной переменной (нескольких переменных). Данный подход был предложен американским экономистом Дамодаром Гуйарати [5, 6]. Применительно к развитию исследуемого процесса значение фиктивной переменной (z_t) принимает значение 1 для всех $t < t^*$ и значения 0 для $t > t^*$.

Возможная форма уравнения регрессии имеет вид:

$$y_t = a + c z_t + b t + d (z_t t) + \varepsilon_t.$$

Таким образом, для каждого промежутка времени формируются следующие уравнения динамики системы. Промежуток 1: $z=0$, $y_t = a + b t + \varepsilon_t$; промежуток 2: $z=1$, $y_t = (a+c) + (b+d) t + \varepsilon_t$.

Применительно к уравнениям (1) и (2), рис. 1 оценки их параметров будут определяться следующим образом: $a_1 = a$, $b_1 = b$; $a_2 = a+c$, $b_2 = b+d$.

Данный подход можно использовать не только в дополнение к тесту Чоу, но и самостоятельно для

проверки гипотезы о структурной стабильности тенденции исследуемого временного ряда. Основное его преимущество перед тестом Чоу состоит в том, что нужно построить только одно, а не три уравнения тренда.

Как показывают исследования, проведенные в [1, 9], реализация рассмотренных выше подходов при комплексном исследовании процессов динамики и развития сложных технических и социально-экономических систем позволит:

- в режиме реального времени уточнять (корректировать) параметры динамики исследуемых систем и объектов;
- формировать (синтезировать) новые уравнения динамики систем и объектов в зависимости от складывающихся условий обстановки и влияния внешних факторов;
- более достоверно осуществлять прогнозную экстраполяцию отдельных параметров и вектора состояний системы в целом;
- проводить анализ структурных изменений в процессе развития системы;
- формировать базу параметров, описывающих возможные сценарии развития (типовые состояния) исследуемых систем;
- повысить надежность и достоверность процессов измерений (определений).

Список использованных источников

1. О. В. Афанасьева, С. В. Колесниченко. Методы научных исследований технических и социально-экономических систем: учебное пособие. СПб.: Изд-во «Сатис». 2015. 124 с.
2. P. Erdi. Complexity explained. 2008. 397 p. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84889991824&origin=resultlist&sort=plf-f&src=s&st1=the+function+of+a+complex+technical+&nlo=&nlr=&nls=&sid=e9b280aedb0407ec09ea31f790fc871c&sot=b&sdt=sisr&sl=51&s=TITLE-ABS-KEY%28the+function+of+a+complex+technical+%29&ref=%28%28complex+objects+and+systems%29%29+AND+%28mathematical+statistics+economic+systems%29&relpos=1&citeCnt=88&searchTerm=>.
3. L. Xu, J. M. Silva-Risso, K. C. Wilbur. Dynamic quality ladder model predictions in nonrandom holdout samples//Management Science, 2018. no 64 (7). P. 3187-3207. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85049393674&origin=resultlist&sort=plf-f&src=s&st1=structural+shift+&nlo=&nlr=&nls=&sid=11abdfdb e56ca0948dc4923706a5a336&sot=b&sdt=sisr&sl=31&s=TITLE-ABS-KEY%28structural+shift+%29&ref=%28%28structural+analysis+and+modeling%29%29+AND+%28economics%29&relpos=14&citeCnt=0&searchTerm=>.
4. A. C. Rencher, G. B. Schaalje. Linear models in statistics. 2007. 672 p. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84889418615&origin=reflist&sort=plf-f&src=s&sid=51738b1324f948e6ff48a821f0a2051e&sot=a&sdt=a&sl=41&s=%28TITLE-ABS-KEY%28tests+Chow+and+Gujarati%29%29&recordRank=>.

5. Эконометрика: учебник/Под ред. И. И. Елисейевой. М.: Финансы и статистика, 2002. 340 с.
6. D. N. Gujarati. Basic Econometrics. McGraw-Hill, Inc, 2006. P. 509-513.
7. А. Г. Алиев. Основы кусочно-линейных экономико-математических моделей с учетом влияния неучтенных факторов на плоскости и многовариантное прогнозирование ими экономического события//Вопросы экономических наук. № 3 (36). 2009. М.: ООО «Издательство «Спутник+». С.187-201.
8. О. В. Прокофьев, А. Е. Савочкин. Алгоритмическая модификация теста ЧОУ для автоматизированной проверки гипотезы о структурной стабильности тренда//XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. № 3 (19). 2014. Пенза: Пензенский государственный технологический университет, С. 183-188
9. С. В. Колесниченко, С. Г. Иванова. Оценка показателей деятельности предприятий методами анализа динамических рядов//Сборник научных статей по итогам Международной НПК «Инновационный потенциал, состояние и тенденции развития в экономике, проектном менеджменте и образовании». СПб.: Изд-во «КультИнформПресс». 2013. С. 206-208.

Information and statistical analysis processes the functioning of a complex technical and socio-economic systems

O. V. Afanaseva, candidate of engineering sciences, associate professor, department of systems analysis and management, faculty of economics, Saint-Petersburg mining university.

S. V. Kolesnichenko, doctor of technical sciences, associate professor, head of the department of mathematical modeling and applied informatics, Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping.

I. M. Novozhilov, candidate of engineering sciences, associate professor of the department of automation and control processes Saint-Petersburg electrotechnical university ETU «LETI».

(Saint-Petersburg, Russia)

Investigated approaches for the linearization of nonlinear equations of dynamics of complex technical and economic systems. The algorithm for constructing the piecewise-linear model hi-dynamics of a complex system (object). The application of the algorithm to determine the presence of structural shifts of the process under study, as well as to estimate the time parameters of the initial trend splitting is justified. Verified algorithm to transition from a single equation non-linear trend piecewise linear model. The proposed algorithms are further developing approaches to modeling trends in time series in the presence of structural changes on the basis of statistical tests G. Chow and D. Gujarati.

Keywords: complex objects and systems, statistical analysis, management, modeling, trend, structural shifts, efficiency, accuracy.

В Москве пройдет III Российско-Китайский форум «Инвестиции в инновации»

16 октября в рамках международного форума «Открытые инновации» состоится III Российско-Китайский форум «Инвестиции в инновации». Мероприятие соберет более сотни представителей ведущих российских и китайских венчурных фондов, институциональных инвесторов, корпораций, органов государственной власти и инновационной инфраструктуры.

Форум организован РВК, Китайским союзом евразийского сотрудничества «Факел» и Венчурным комитетом Всекитайской ассоциации финансового содействия развитию науки и техники при поддержке Министерства экономического развития России и Министерства науки и техники Китая.

Цель мероприятия — создание возможностей для прямого и открытого диалога между технологическими инвесторами России и Китая. Форум позволит стимулировать двустороннее сотрудничество в области развития инноваций, привлечь китайских инвесторов к участию в капитале российских технологических компаний, а также расширить возможности работы инновационного бизнеса на рынках двух стран.

Среди спикеров форума — представители Венчурного комитета Всекитайской ассоциации финансового содействия развитию науки и техники, Министерства науки и техники Китая, Шэньчжэньской фондовой биржи, китайских венчурных фондов и корпораций: Shenzhen Capital Group, TUS Holding, China Merchant Capital и др.

Участники обсудят тенденции развития рынка венчурных инвестиций и инновационных экосистем России и Китая, изучат возможности создания совместных инвестиционных проектов и сотрудничества в сфере высоких технологий. В рамках форума пройдет презентация российских технологических стартапов перед китайскими венчурными фондами.

«Сегодня Россия и Китай плодотворно взаимодействуют во многих сферах. Одна из главных точек соприкосновения интересов наших стран — сфера инноваций и новых технологических возможностей. Являясь второй после США экономикой в мире, Китай становится привлекательным рынком сбыта для российских технологических компаний, а крупные финансовые площадки страны могут предложить хорошие инструменты для привлечения капитала. С 2014 года РВК выстроила систему партнерских отношений с ключевыми участниками китайской венчурной и инновационной индустрии. Наша общая цель — сформировать условия для динамичного развития инновационного бизнеса», — отмечает генеральный директор РВК Александр Повалко.

«Сотрудничество Китая и России в области научно-технических инноваций сегодня развивается стремительными темпами. Китайские инвесторы высоко оценивают потенциал российских технологических компаний. В этом году Российско-Китайский форум «Инвестиции в инновации» пройдет уже в третий раз, и впервые — в рамках масштабного инновационного форума «Открытые инновации». Уверена, что предстоящее мероприятие будет успешным», — комментирует председатель Венчурного комитета Всекитайской ассоциации финансового продвижения науки и техники Сю Сяопин.

Российско-Китайский форум «Инвестиции в инновации» проводится ежегодно с 2016 года в соответствии с меморандумом о сотрудничестве в сфере инноваций, подписанным между Министерством экономического развития РФ и Министерством науки и техники КНР. В сентябре 2016 года форум прошел в Москве, в июне 2017 года — в Харбине.

Программа III Российско-Китайского форума «Инвестиции в инновации» доступна на сайте: www.invest-to-innovation.com.