2. Романенков В.А. Методические вопросы интенсификации процесса пропитки при изготовлении тепловой защиты космических кораблей / В.А., Романенков, А.М., Ильина, Д.В., Евсеев, Б.П., Парфюмов, В.А., Тарасов/. – XLI Академические чтения по космонавтике. – 2017 – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – с. 495.
3. Романенко П.Н. Теплопередача / П.Н., Романенко, А.Н., Обливин, Ю.П. Семёнов. –Изд-во «Лесная промышленность», 1969. – 432 с.
4. Котенко В.Д. Технология получения препрегов с высоким содержанием полимера / В.Д. Котенко, В.В., Абраумов, И.В., Сапожников, В.А., Романенков, Л.Н., Кузнецова, А.И., Терехин. // Вестник МГУЛ. Лесной вестник. – №1(93). – 2013. – с. 77 - 81.
5. Глебов И.В. Математическая модель многократной пропитки пористых тел растворами полимеров // И.В., Глебов, В.Д., Котенко, В.А., Романенко /. Наука и образование, МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал, № 11. – 2015. – с. 238 - 248.
6. Глебов И.В. Способ автоматического управления вакуумной технологией изготовления препрегов // И.В., Глебов, В.Д., Котенко /. Труды МАИ. – вып. № 83. – 2015. – с. 1 - 12.
7. Котенко В.Д. Вакуумная технология получения многослойных препрегов с высоким содержанием полимеров / В.Д. Котенко, И.В. Глебов / Вестник МГУЛ. Лесной вестник. – т. 20. – № 3. – 2016. – с.29 - 34.
8. Котенко В.Д. Охлаждаемый контейнер для аппаратуры / В.Д. Котенко, И.В. Сапожников // Технология химической переработки древесины. Науч. труды. Вып. 267. – М.: МГУЛ, 1996 г. – с. 64-68.
9. Хопман К. Щелевая пропитка под давлением для сокращения времени цикла производства изделий из композитов / К. Хопман, В. Михаэли, Р. Бастиан // Полимерные материалы, №2, IKV (г. Аахен, Германия). – 2014. – с. 4-11.

Мусаев А.А., Фенин М.М.

Анализ трендов хаотических процессов как прогностических индикаторов разладки

*Санкт-Петербургский Государственный Технологический Институт
(технический университет)" (СПбГТИ(ТУ))
(Россия, Санкт-Петербург)*

doi:10.18411/spc-12-12-2017-17

ids: 000001:spc-12-12-2017-17

Аннотация

Представлены описания и результаты серии вычислительных экспериментов, посвященных исследованию возможности использования трендов, возникающих в хаотических процессах, как прогностических индикаторов разладки сложных технических систем (СТС).

Ключевые слова: хаотические процессы, инерционность, контроль состояния, сложные технические системы.

1. Введение. Стационарное состояние СТС, отвечающее заданному режиму регламента ее эксплуатации, сопровождается шумовой хаотической динамикой, обусловленной большим количеством разнообразных неконтролируемых факторов влияния. При этом обнаружение системного тренда в этой шумовой компоненте может служить прогностическим индикатором возникновения разладки, ведущей к возникновению неисправности или отказа.

Обнаружение системного тренда хаотических процессов является ключевой с точки зрения принципиальной возможности построения системы прогностической диагностики СТС. Идеальный хаотический процесс не имеет и не может иметь системного тренда, под которым понимается способность сохранять тенденцию развития в течение заданного интервала времени. Однако реальный хаос, как правило, содержит локальные тренды, существенно снижающие его энтропию. При этом

возникает основа для возникновении ложных трендов, не имеющих системной основы и лишь имитирующих возможность возникновения разладки.

Отсюда возникает задача экспериментального подтверждения возможности контроля состояния системы на основе раннего обнаружения системного тренда при наблюдении за реальными шумовыми процессами. Численный анализ данной проблемы представлен в настоящей работе. Работа носит общий характер и относится к задачам оценки возможности построения диагностических стратегий в нестационарных и хаотических средах [1-5].

2. Описание вычислительного эксперимента. В качестве полигона шумовых хаотических данных для вычислительного эксперимента используются ряды нормированных и центрированных наблюдений $Y(t)$ за стационарным состоянием ректификационной колонны на пяти различных непересекающихся временных интервалах непрерывного наблюдения с дискретом времени $\tau = 1$ мин., а также ее сглаженное значение $Y_s(t)$. Сглаживание осуществляется экспоненциальным фильтром с коэффициентами передачи $\alpha = 0.005, 0.01, 0.02$.

Начало каждого локального эксперимента может осуществляться (фиксироваться) в любой момент времени $Y(t_0)$. После того, как процесс $Y(t)$ преодолел в одном направлении порог обнаружения (фиксации) тренда $Y_d = Y(t_0) + dD$ (или $Y_d = Y(t_0) - dD$) начинается проверка факта подтверждения (или отрицания) его наличия. Индекс d отвечает уровню обнаружения (detection) тренда (реального или ложного), индекс c – уровню подтверждения (confirmation). Положительным исходом (или событием, благоприятным гипотезе H_0 о наличии тренда), будем называть достижение процессом $Y(t)$ уровня подтверждения $Y_c = Y_d + dC$ (для положительного тренда) или $Y_c = Y_d - dC$ (для отрицательного тренда). При этом монотонности динамики от момента обнаружения тренда до его подтверждения не требуется. Достаточно того, чтобы процесс достигнул уровня подтверждения раньше, чем он пересечет уровень фиксации его отсутствия, заданный в противоположном направлении. Соответственно, отрицательным закрытием или событием, благоприятным альтернативной гипотезе H_1 об отсутствии тренда, будем называть достижение процессом $Y(t)$ уровня фиксации его отсутствия раньше, чем он пересечет уровень его подтверждения.

3. Эксперимент 1. Сравнение результатов обнаружения тренда для шумовой компоненты наблюдения за состоянием СТС. Вычислительная схема 1 эксперимента базируется на собственной динамике процесса $Y(t)$. Во второй вычислительной схеме используется комбинированный подход, когда фиксация тренда осуществляется процессом $Y_s(t)$, а его подтверждение – процессом $Y(t)$. В третьей вычислительной схеме для фиксации и подтверждения тренда используется сглаженный процесс $Y_s(t)$.

Рассмотрим задачу оценки вероятности подтверждения наличия тренда у исследуемого процесса для уровня подтверждения $dC = 100$ п. (пункт – нормированная единица измерения $Y(t)$). Равенство уровней подтверждения и опровержения наличия тренда связано с симметричной постановкой исходной задачи. Выбор величины $dD = dC = 100$ п. является ориентировочным и обусловлен тем, что

значение уровней обнаружения и подтверждения тренда должно явно превалировать над случайным разбросом. Для приведенных примеров значение среднеквадратичного отклонения вариаций $Y(t)$ относительно сглаженного усредненного процесса $Y_s(t)$ лежит в диапазоне 15-25п.

Таблица 1

Частота подтверждения тренда с $\alpha = 0.01$.

Временной интервал, сутки	Параметр 1			Параметр 2		
	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 1	Схема 2	Схема 3
1-100	0.54	0.52	0.71	0.49	0.52	0.67
101-200	0.50	0.53	0.72	0.50	0.54	0.73
201-300	0.54	0.50	0.72	0.53	0.54	0.72
301-400	0.48	0.43	0.69	0.50	0.50	0.69
401-500	0.48	0.43	0.66	0.51	0.55	0.72

Как видно из таблицы 1, наличие случайной компоненты в схемах 1 и 2 для фиксации начала и завершения локальных опытов не позволяет выявить наличие какого-либо значимого подтверждения тренда. В схемах 1 и 2 факт обнаружения тренда на участке dD совершенно не гарантирует его инерционной сохранности на последующем участке такой же длины. Применение сглаженной кривой для фиксации тренда в вычислительной схеме 3 подтверждает его наличие.

Выбор вычислительной схемы 3 для дальнейших исследований связан с тем, что она в большей степени отражает системную динамику, а, следовательно, и диагностические аспекты исследуемого процесса.

Недостатком схем со сглаживанием является наличие задержки сглаженной кривой $Y_s(t)$ относительно реального процесса $Y(t)$, что может существенно усложнить возможность построения эффективного прогноза, основанного на использовании трендовой динамики.

Таблица 2

Частота положительных исходов для вычислительной схемы 3

Временной интервал, сутки	Параметр 1, $dC=75$			Параметр 2, $dC=75$		
	$\alpha = 0.02$	0.01	0.005	0.02	0.01	0.005
1-100	0.69	0.61	0.71	0.57	0.62	0.68
101-200	0.72	0.76	0.75	0.72	0.74	0.81
201-300	0.66	0.66	0.65	0.70	0.73	0.78
301-400	0.55	0.57	0.60	0.67	0.70	0.79
401-500	0.58	0.59	0.63	0.68	0.71	0.79

Временной интервал, сутки	Параметр 1, $dC=50$			Параметр 2, $dC=50$		
	$\alpha = 0.02$	0.01	0.005	0.02	0.01	0.005
1-100	0.58	0.63	0.70	0.63	0.70	0.71
101-200	0.70	0.72	0.80	0.75	0.76	0.82
201-300	0.71	0.76	0.78	0.72	0.76	0.80
301-400	0.66	0.67	0.72	0.70	0.71	0.75
401-500	0.65	0.67	0.68	0.70	0.73	0.77

4. Эксперимент 2. Анализ трендов для сглаженной составляющей хаотического процесса. Рассмотрим вопрос о подтверждении тренда на меньших участках фиксации. В частности, исследуем вышеприведенную задачу с

вычислительной схемой 3, в которой открытие и закрытие открывается на основе сглаженной кривой с тремя уровнями коэффициента передачи:

$$\alpha = 0.02, 0.01, 0.005 .$$

В качестве примера будем рассматривать динамику стационарного режима ректификационной колонны для тех же параметров мониторинга, что и в предыдущем случае. Результаты моделирования приведены в таблице 2. Из приведенных результатов видно, что увеличение коэффициента передачи сглаживающего фильтра приводит к росту инерционности системной составляющей процесса. Однако искусственность такого подхода может привести к некорректным выводам при формировании диагностических решений в силу неизбежного отставания динамики сглаженной кривой $Y_s(t)$ от реального процесса $Y(t)$. В частности, явно выраженный перевес частоты положительных исходов (60-70%) совершенно не означает соответствующий перевес правильных решений над ложными тревогами.

Рис. 1. Пример ошибки прогноза, основанного на обнаружении ложного тренда

5. Эксперимент 3. Анализ качества прогностических решений, основанных на гипотезе об инерционности тренда.

Предположим, что гипотеза H_0 о наличии системного тренда верна. Рассмотрим для данного утверждения основные проблемы, возникающие при формировании прогностических решений, непосредственно использующих данное предположение. Общая постановка таких решений сводится к фиксации факта обнаружения тренда в сторону, соответствующую направлению выявленной тенденции. Установление факта подтверждения тренда (т.е. обнаружения системной

разладки) основано на событии перехода состояния системы с уровня L_d на уровень $L_d + dC$ (восходящий тренд) или на уровень $L_d - dC$ (нисходящий тренд). Простейшая стратегия формирования прогностических решений, основанная на трендовой динамике, сводится к предсказанию возможной разладки при установлении факта наличия положительного или отрицательного трендов. Очевидно, что такие решения будут «ложными тревогами» при «переломах» тренда (рис. 1).

Рис. 2. Типичный участок ошибочных решений, основанных на использовании трендов

Особенно велика численность ошибок типа «ложная тревога» при боковом тренде с размахом системной (сглаженной) составляющей, больше величины dD (с

тем, чтобы ложный тренд был обнаружен), но меньше, чем $dD + dC$, когда он подтверждает свою истинность. Пример такого бокового тренда представлен на рис. 2.

Как видно из приведенного рисунка, в случае, когда факт подтверждения тренда совмещен с одновременным обнаружением нового тренда в соответствующую сторону, наличие бокового тренда с указанным выше диапазоном размаха колебаний, приводит к последовательности из 8 ложных тревог.

5. Исследование инерционности тренда для различных уровней подтверждения.

Сам факт подтверждения обнаружения тренда предполагает симметрию положительного и отрицательного исходов. Однако при разработке и анализе прогностических стратегий последнее равенство соблюдать не требуется. Рассмотрим задачу обнаружения тренда для различных сочетаний этих параметров на примере измеряемого параметра 1 ректификационной колонны с использованием сглаженной кривой с $\alpha = 0.01$. Для статистического анализа гипотезы о наличии тренда используем симметричную подтверждения тренда $dC+ = dC- = dC$.

Таблица 3

Частота положительных исходов для вычислительной схемы 3 и различных уровней подтверждения тренда

Временной интервал, сутки	Параметр 1, $dL=100$			Параметр 2, $dL=100$		
	$CL=75$	$CL=50$	$CL=25$	$CL=75$	$CL=50$	$CL=25$
1-100	0.63	0.67	0.74	0.64	0.79	0.75
101-200	0.75	0.75	0.90	0.75	0.79	0.84
201-300	0.72	0.73	0.79	0.66	0.65	0.84
301-400	0.62	0.63	0.76	0.55	0.68	0.81
401-500	0.60	0.61	0.72	0.59	0.63	0.83

Таблица 4

Частота положительных исходов для вычислительной схемы 3 и различных уровней фиксации тренда

Временной интервал, сутки	Параметр 1, $dL=75$			Параметр 1, $dL=50$		
	$TP=75$	$TP=50$	$TP=25$	$TP=75$	$TP=50$	$TP=25$
1-100	0.57	0.70	0.74	0.67	0.68	0.71
101-200	0.72	0.73	0.84	0.75	0.75	0.84
201-300	0.70	0.74	0.78	0.69	0.72	0.80
301-400	0.67	0.69	0.80	0.68	0.70	0.80
401-500	0.68	0.71	0.79	0.66	0.70	0.78

Нетрудно видеть, что снижение уровня подтверждения тренда dC с 75п. до 25п. приводит к некоторому росту вероятности событий, подтверждающих гипотезу H_0 . Переход к более изменчивому параметру 2 существенного не изменяет полученных ранее оценок. Снижение уровня фиксации тренда dC со 100п. до 75п., и далее до 50п., как это видно из данных, приведенных в таблицах 3-4, оказывает крайне незначительное влияние на оценку вероятности, подтверждающую гипотезу H_0 .

При этом заметно явное превышение частоты достижения уровня фиксации тренда над уровнем 50%, соответствующем подтверждению гипотезы H_1 об отсутствии системной составляющей. Тем не менее, данный результат остается крайне слабым с точки зрения теоретической платформы для построения прогностических решений, основанных на хаотической динамике. Прямое использование инерционности зафиксированной тенденции неизбежно ведет к недопустимому уровню ложных тревог.

Одной из причин негативного результата является загробленная методика подтверждения тренда, требующая только перехода процесса $L \rightarrow L + dC$ раньше, чем $L \rightarrow L - dC$ (положительный тренд) или наоборот, $L \rightarrow L - dC$ раньше, чем $L \rightarrow L + dC$ (отрицательный тренд). В то же время качество самого перехода никак не учитывалось. Этому вопросу будут посвящены последующие исследования.

Заключение. Полученные результаты вычислительных экспериментов подтверждают очевидную гипотезу о наличии системных трендов в динамике шумовой составляющей результатов мониторинга состояния СТС, возникающих при возникновении технических разладок. Однако обнаружение реальных трендов существенно усложнено количеством ложных тревог, возникающих в результате специфики хаотической динамики наблюдений в окрестности рабочей точки заданного стационарного режима. При этом вероятность обнаружения системного тренда соизмерима с вероятностью ложной тревоги. Улучшение результатов трендового индикатора может быть достигнуто за счет использования сглаженной траектории с коэффициентом передачи, лежащим в пределах $\alpha = [0.005 - 0.02]$. Дальнейшее совершенствование данного подхода связано с анализом качественных характеристик обнаруженного тренда, что предполагается осуществить в дальнейших исследованиях.

1. Мусаев А.А. Статистический анализ инерционности хаотических процессов // Труды СПИИРАН, 2014. Вып. 2(33). С. 48-59.
2. Peters E. E. Chaos and order in the capital markets: a new view of cycles, prices, and market volatility (2nd ed.) / NY: John Wiley & Sons, 1996. 288p.
3. Kaltwasser P.R. Uncertainty about fundamentals and herding behavior in the Forex market // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2010. Т. 389. № 6. С. 1215-1222.
4. Bosse T., Treur J., Jonker C.M. Formal analysis of design process dynamics // AI EDAM. 2010. Т. 24. № 3. С. 397-423.
5. Гринблат Д. Из прошлого в будущее. // Forex magazine. 2014. №523/15. С. 22-24.