

А.А. МУСАЕВ

## АДАПТИВНАЯ МУЛЬТИРЕГРЕССИОННАЯ ОЦЕНКА В УСЛОВИЯХ ХАОТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВАЛЮТНОГО РЫНКА

---

*Мусаев А.А. Адаптивная мультирегрессионная оценка в условиях хаотических процессов валютного рынка.*

**Аннотация.** Рассмотрена задача мультирегрессионной оценки стоимости валютного инструмента на основе адаптивного выбора регрессоров, образованных группой валютных пар, наиболее коррелированных с оцениваемым активом. В условиях хаотической динамики котировок валютных инструментов степень корреляции между валютными парами изменяется во времени. Отсюда возникает задача адаптивного оценивания с переменным составом группы регрессоров. Для оценки потенциального выигрыша, достигаемого при использовании управляющей стратегии на основе предложенного подхода, используется метод эволюционного моделирования.

**Ключевые слова:** хаотические процессы, мультирегрессионная оценка, корреляционный анализ, численный анализ, адаптация, эволюционное моделирование, валютный рынок, валютные инструменты, Forex.

*Musaev A.A. Adaptive Multiregression Currency Estimation in the Chaotic Market Environment.*

**Abstract.** The problem of multiregression estimation of the currency cost is considered. The offered approach is based on an adaptive choice of the regressors formed by group of currency pairs, the most correlated with an estimated asset. In the conditions of chaotic dynamics of currency quotations, correlation degree between currency pairs changes in time. From here the problem of adaptive estimation with variable structure of group of regressors follows. The method of evolutionary modeling is used for an assessment of the potential prize, reached when using the corresponding control strategy

**Keywords:** chaotic processes, multiregression estimation, correlation analysis, numerical analysis, adaptation, evolution modeling, currency, Forex.

---

**1. Введение.** Динамика котировок на рынках капитала носит хаотический характер [1–4]. Символом хаоса является его непредсказуемость. Однако существуют закономерности столь высокого порядка, что им подчиняется даже динамика хаоса – законы диалектики [5]. В соответствии с гегелевскими законами происходит отрицание отрицания хаоса. Иными словами, хаос неизбежно порождает порядок. Умение обнаружить и использовать локальные проявления порядка являются характерной чертой трейдеров-профессионалов, отличающих от огромного коллектива неудачников валютного рынка.

Важным направлением поиска упорядоченных структур в хаосе является анализ взаимных корреляционных связей, т.е. переход в область многомерного анализа данных [6, 7]. Рассмотрение поведения конкретного рыночного актива на фоне динамики тесно связанного с ним сегмента валютного рынка создает предпосылку для построения

управляющих стратегий на основе использования локальных упорядоченных структур – коррелированных групп наблюдения. Действительно, наличие локальных корреляционных связей позволяет формировать скользящие оценки рыночной стоимости валютного актива по совокупности текущих наблюдений котировок связанных с ним валютных инструментов.

Текущее значение котировок может существенно отличаться от ее рыночной оценки, т.е. оценки, отражающей рыночные представления о ее стоимости. Это связано с наличием статистических флуктуаций, обусловленных большим числом полностью или частично неконтролируемых факторов. В этом случае рынок будет стремиться устранить данное несоответствие, что неизбежно перепределил направление движения котировки актива. Указанное свойство служит основой для построения так называемых осцилляторов [8], т.е. индикаторов состояния рынка, основанных на недооценке или переоценке текущей стоимости актива.

Пример построения *мультирегрессионной* (MR, multiregression) оценки, основанной на совокупности регрессоров из трех ведущих валютных пар (EURUSD, EURJPY, USDJPY) и исследование ее эффективности приведен в [9]. В этой же работе приведены примеры, иллюстрирующие влияние размера окна наблюдения на качество MR оценки в условиях рыночной динамики котировок. Очевидно, что механистический выбор регрессоров, не учитывающий реального уровня их корреляционной связи с активом, существенно снижает эффективность соответствующей управляющей стратегии. В связи с этим в настоящей работе рассмотрена задача оценки текущей стоимости актива на основе группы валютных пар, наиболее коррелированных с указанным валютным активом.

Важно заметить, что корреляционная матрица хаотического многомерного процесса является нестационарной и неэргодичной. Однако ее изменения, в отличие от исходных процессов динамики котировок, как показано в [7], достаточно инерционны. Это позволяет перейти к адаптивной схеме, основанной на периодическом пересчете корреляционной матрицы валютного рынка и, при необходимости, к изменению состава группы регрессоров.

Другое важное замечание связано с математической некорректностью применения алгоритмов обработки данных, основанных на вероятностно-статистической парадигме, к хаотическим процессам. В частности, нарушается базовый постулат вероятностной аксиоматики, предполагающий повторяемость опытов в идентичных условиях. В свою очередь, некорректность применения статистических алгоритмов

оценивания неизбежно приводит к снижению их эффективности. Реализация аналитических исследований качества регрессионных оценок потребует введения ограничений, не отвечающих характеру протекающего хаотического процесса. Поэтому установление границ допустимости (точнее – пригодности) применения алгоритмов статистической обработки возможно лишь на основе экспериментального численного анализа.

Последнее замечание связано с необходимостью оценки потенциальной эффективности управляющей стратегии, основанной на адаптивном MR-оценивании. В настоящей работе такая оценка, осуществлялась методом эволюционного моделирования [10].

**2. Постановка задачи.** Пусть  $\{Y_k, k = 1, \dots, n\}$  - дискретный временной ряд наблюдений текущей стоимости валютного инструмента. Стоимость актива подвержена случайным флуктуациям, приводящим к возможным отклонениями ее от представления рынка об ее истинной стоимости. В качестве оценки рыночной стоимости используется регрессионная оценка вида:

$$\hat{Y}_k = \sum_{j=1}^m c_j X_{kj}, \quad k = 1, \dots, n,$$

где  $X_{kj}$  - значения группы из  $m$  регрессоров на  $k$ -й момент времени наблюдения, образующие матрицу наблюдений  $X = \{X_{kj}, k = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m\}$ ,  $c = (c_1, c_2, \dots, c_m)^T$  - вектор коэффициентов регрессии. Наличие оперативной оценки текущей стоимости валютного инструмента  $\{\hat{Y}_k, k = 1, \dots, n\}$  позволяет построить вариант управляющей стратегии, основанной на величине и знаке разности  $\{d_k = \hat{Y}_k - Y_k, k = 1, \dots, n\}$ .

В дальнейшем для описания многомерной линейной регрессии будем использовать матричную нотацию [11, 12] вида  $\hat{Y} = Xc$ .

Минимизируя сумму квадратов ошибок  $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)^T$

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon^2 = \varepsilon^T \varepsilon = (Y - Xc)^T (Y - Xc),$$

приходим к системе нормальных уравнений, решение которых, в свою очередь, позволяет определить хорошо известное соотношение для оценки параметров регрессии по МНК (метод наименьших квадратов)  $\hat{c} = (X^T X)^{-1} X^T Y$ .

Для оценки векторного коэффициента передачи  $\hat{c}$  будет использоваться скользящее окно наблюдения:

$$w_i = (Y_{i-m}, Y_{i-m+1}, \dots, Y_i), \quad i = (m+1), \dots, n,$$

позволяющее снизить влияние нестационарности на качество обработки данных. Организация скользящего окна наблюдения и отвечающая ему схема структуризации данных представлена в [13]. При этом информационная платформа анализа формируется в виде двумерной таблицы, в левой части которой представлены данные наблюдений за регрессорами, в роли которых, в данном случае, выступают валютные инструменты рынка Forex. Правая часть таблицы представлена наблюдениями за оцениваемым активом.

Величину разности  $d_i = \hat{Y}_i - Y_i$ , где  $\hat{Y}_i = \hat{c}_i X_i$  - оценка стоимости актива, сформированная на основе текущих значений регрессоров, можно использовать для анализа текущего состояния наблюдаемого валютного инструмента.

В силу хаотичности, а следовательно, и нестационарности ряда наблюдений, корреляционная матрица валютных пар  $R_{ij} = cor(Y_i, Y_j)$  изменяется во времени. Следовательно, оптимальной состав фиксированной по размеру группы регрессоров  $\{X_{kj}, k = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m\}$  также будет меняться и его необходимо корректировать. В связи с этим используется адаптивная схема регрессионного оценивания с периодической коррекцией состава указанной группы регрессоров.

В качестве модели валютного рынка используем группу из 16-ти наиболее часто используемых валютных инструментов, представленных в табл. 1. В дальнейшем для обозначения валютных пар будем использовать их номера в этой таблице.

Таблица 1. Валютные инструменты

№№	1	2	3	4
Инструмент	EURUSD	EURJPY	EURGBP	EURCHF
№№	5	6	7	8
Инструмент	EURCAD	USDCAD	USDCHF	USDJPY
№№	9	10	11	12
Инструмент	GBPCHF	GBPJPY	GBPUSD	AUDJPY
№№	13	14	15	16
Инструмент	AUDUSD	CHFJPY	NZDUSD	NZDJPY

Для оценки коэффициентов корреляции между валютными парами будем использовать известное соотношение  $r_{ij} = s_{ij} / \sqrt{s_{ii}s_{jj}}$ , где

$s_{ij}$ ,  $i, j = 1, \dots, m$  - коэффициенты ковариации, образующие в совокупности матрицу ковариаций:

$$S = X^T X / (n - 1) = \{s_{ij}, i, j = 1, \dots, m\}.$$

В качестве оптимальной группы регрессоров выбираются  $m$  валютных пар, обладающих наибольшими значениями коэффициента корреляции с валютной парой, используемой в качестве рабочего актива для получения спекулятивного выигрыша.

**3. Предварительный анализ корреляций.** В качестве предварительной задачи рассмотрим оценку матрицы корреляций  $R = \{r_{ij}, i, j = 1, \dots, m\}$  для совокупности наблюдений за всеми 16 параметрами на временном интервале в 100 дней.

Тональное представление матриц корреляций между 16 валютными инструментами приведено на рисунке 1. Наиболее светлые тона соответствуют сильной положительной корреляционной связи, а наиболее темные – отрицательной.

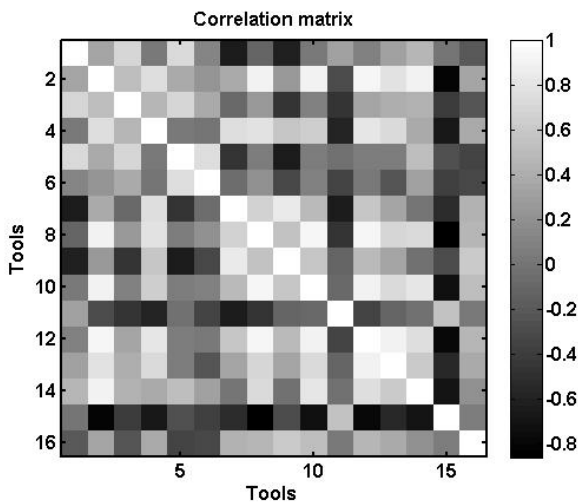


Рис. 1. Тональное представление матриц корреляций между 16 валютными инструментами

Практический вывод из рассмотрения тональной матрицы состоит в существенном разбросе значений коэффициента корреляции для различных валютных пар. Достаточно очевидно, что если коэффициент валютной пары относительно используемого актива колеблется

в пределах  $(-0.5, +0.5)$ , то такую пару не следует использовать в качестве регрессора, ее значения практически не содержат полезной информации, используемой для оценивания актива.

Как уже отмечалось выше, динамика котировок является хаотическим процессом, а следовательно, и нестационарным. Это приводит к изменению значений корреляционных связей во времени. При этом данное изменение происходит относительно медленно и нет необходимости пересчитывать значения корреляционной матрицы на каждом шаге наблюдений.

В качестве грубого приближения будем использовать период между такими пересчетами в 8-10 часов. Об оптимальности выбора такого интервала говорить сложно, поскольку, в силу хаотичности наблюдаемых процессов, любая оптимальная совокупность параметров будет условной и привязанной к определенному временному интервалу ретроспективных наблюдений. Смена интервала наблюдений (даже при очень больших размерах наблюдений) неизбежно приведет к изменению значений оптимальных параметров. Такова природа хаоса.

**4. Пример. Реализация простейшей управляющей стратегии с адаптивной МР оценкой.** Рассмотрим в качестве примера изменения группы оптимальных регрессоров для валютного актива, образованного седьмым валютным инструментом USDCHF. На рис. 2 представлена динамика изменения котировки в течение 10 дней на фоне изменения котировок пяти валютных пар, наиболее коррелированных с ним на указанном интервале наблюдения. Соответствующая группа образована валютными парами с номерами [1, 8-10, 16].

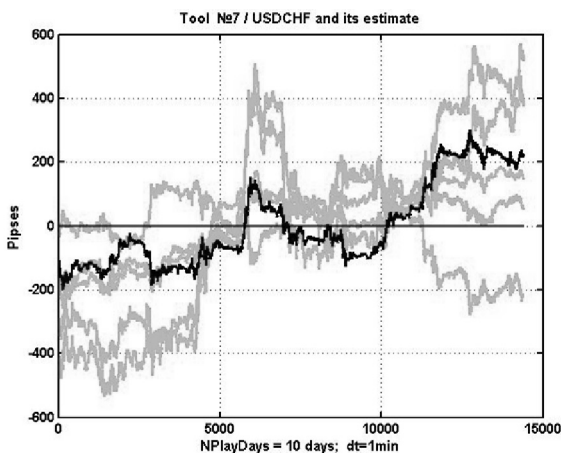


Рис. 2. Динамика изменения котировки валютного инструмента и группы 5 наиболее коррелированных с ним валютных пар

Заметим, что один из элементов ведет себя противофазно по отношению к изучаемому процессу. Это связано с тем, что степень взаимосвязи оценивается по модулю. Валютная пара с сильной отрицательной связью также несет в себе большой объем информации о поведении связанного с ним инструмента. При этом соответствующий регрессионный коэффициент перед этим членом будем иметь отрицательный знак.

В рамках принятых ограничений, будем осуществлять пересчет корреляционной матрицы рынка (т.е. всех 16-ти валютных пар). Из полученной матрицы выбирается строка, соответствующая номеру рабочего актива, и упорядочивается по убыванию значений модулей. Наблюдения полученного вариационного ряда со 2-го по (m+1)-й определяют группу регрессоров с наибольшими по модулю значениями корреляционных связей. Соответствующие результаты, полученные для 24-х непересекающихся 10-часовых интервалов наблюдения, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Упорядоченные по убыванию степени коррелированности списки регрессоров на непересекающихся интервалах наблюдений длительностью 10 часов

Интервалы наблюдения	Номеров регрессоров
1-7	1 9 8 10 16
8-10	9 1 10 8 16
11	9 10 1 8 16
12-14	9 8 10 16 1
15-17	9 8 10 16 1
18-19	8 9 10 16 4
20-21	8 9 10 4 16
22-24	9 8 10 4 16

Из приведенных данных видно, что в течение первых семи интервалов наблюдения оптимальная группа регрессоров <1 9 8 10 16> не менялась. На 8-10 шагах состав группы также сохранился, но первый и девятый регрессоры поменялись местами. Дальнейшая эволюция состава группы регрессоров понятна из приведенных в таблице данных.

Общий вывод состоит в том, что состав группы регрессоров меняется достаточно медленно и 10-дневный интервал адаптации является вполне приемлемым для формирования регрессионных оценок с заданным составом регрессоров.

На рисунке 3 представлен пример реализации простейшей управляющей стратегии, основанной на адаптивной MR-оценке. В случае, если значения разности  $d_k$  между оценкой и текущей стоимо-

стью валютного инструмента оказывается больше (по модулю) порогового значения  $B$ , формируется рекомендация на открытие позиции в соответствующую сторону.

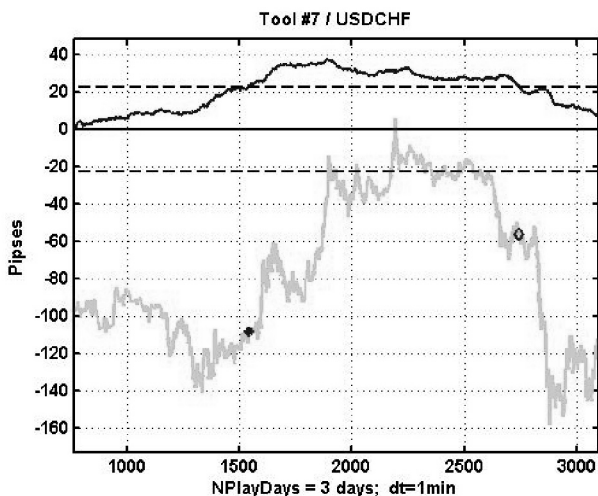


Рис. 3. Пример реализации простейшей управляющей стратегии с адаптивным МР осциллятором

На рисунке 3 приведен центрированный график динамики котировки валютного инструмента USDCHF (здесь - нижний график) и сглаженный график  $d_k$  (верхний график) на интервале наблюдения в 3 дня. Звездочкой отмечено состояние котировки в момент открытия позиции вверх. Ромбик соответствует моменту закрытия позиции, осуществляемому при обратном пересечении графика  $d_k$  порогового значения  $B$ .

**5. Оценка потенциальных характеристик управляющей адаптивного МР осциллятора на основе эволюционной оптимизации параметров стратегии.** Отсутствие аналитического представления исходного хаотического процесса не позволяет получить точную оценку потенциальных возможностей выбранной управляющей стратегии. Наиболее эффективным способом получения такой оценки является численный анализ, основанный на случайном поиске оптимальных параметров управляющей стратегии. Вариантом реализации случайного поиска является технология эволюционного моделирования, предложенная в [10], и нашедшая широкое применение в задачах численной оптимизации [14–19]. Особенности применения эволюционно-



го моделирования в задачах параметрической оптимизации управляющих стратегий приведены в [20].

В качестве примера рассмотрена задача оптимизации описанной выше простейшей управляющей стратегии, когда открытие позиции осуществляется при пересечении сглаженного значения  $\{d_k = \hat{Y}_k - Y_k, k = 1, \dots, n\}$  порогового значения  $\pm B$ . Закрытие позиции производится при обратном пересечении процессом  $d_k$  уровня  $\pm B/2$ .

Список оптимизируемых параметров стратегии  $G = [nW, \alpha, B]$  (в терминах эволюционного моделирования – геном  $G$ ) включает в себя размер скользящего окна наблюдения  $nW$ , на котором производится регрессионная оценка, коэффициент экспоненциального сглаживания  $\alpha$  и уровень принятия решения  $B$ .

На начальном этапе путем внесения малых (в пределах среднеквадратических отклонений (ско) соответствующих параметров) вариаций во все параметры формируется группа геномов-предков или анцесторов (ГА) размером  $N_a$ . Далее, в цикле по числу поколений  $N_{gc}$ , формируется новое поколение, состоящее из уже сформированной группы геномов-предков и формируемой группы геномов-потомков или дескендеров (ГД). Геномы потомки формируются из геномов-предков тремя основными способами [20], включающими в себя:

1. Небольшие единичные изменения, вносимые в один из параметров ГА. Выбор параметра осуществляется случайным розыгрышем. Если же предполагается вносить изменения последовательно в каждый параметр, то каждый ГА получает  $m_g$  модификаций, где  $m_g$  - размер генома. В этом случае возникает  $N_d^{(1)} = N_a m_g$  потомков с заданным типом модификации, причем в каждом из них модифицируется только один параметр (ген). В данном случае  $m_g = 3$ , следовательно, если в каждом поколении сохранять  $N_a = 4$  наилучших вариантов (предков), получим  $N_d^{(1)} = 12$  версий ГД первого типа.

2. Небольшие групповые изменения. Осуществляется аналогично  $SSM$ , но изменения вносятся не в один, а сразу во все параметры. Таким образом, возникает еще  $N_d^{(2)} = 4$  версии ГД с медленными изменениями во всех генах.

3. Сильные единичные изменения или параметрическая мутация. Выбор ГА и номера гена осуществляется случайным розыгрышем. С вероятностью параметрической мутации  $P_{pt}$  получает  $N_d^{(3)}$  потомков, в каждом из которых модифицируется один ген в диапазоне  $|\Delta| > 3\sigma$ .

В качестве примера использовалась программа с числом смены поколений  $N_{gc} = 9$  на одном и том же временном интервале в 10 дней. В качестве начального генома использовался вектор  $G_0 = [nW_0, \alpha_0, B_0] = [5, 0.01, 0.6]$ . При формировании модифицированных геномов использовались грубые оценки ско трех перечисленных параметров  $SkoG = [3, 0.02, 0.5]$ .

Для сравнения потенциальной эффективности управляющих стратегий, основанных на МР оценке состояния используемого актива рассматривались два варианта:

1. Вариант с фиксированной группой из пяти регрессоров, выбранных перед началом торговых операций на основе критерия максимальной коррелированности с рабочим инструментом (активом). Корреляционная матрица для 16 финансовых инструментов оценивалась на основе наблюдений за их котировками в течение 15 дней, предшествующих началу торгов.

2. Вариант с последовательной коррекцией группы из пяти регрессоров. Коррекция осуществлялась на основе того же критерия максимальной коррелированности с рабочим инструментом (активом) с интервалом в 10 часов. Оценка корреляционной матрицы осуществлялась по результатам наблюдений за их котировками на скользящем окне наблюдения размером также в 15 дней.

Поскольку оценка выигрыша осуществлялась с использованием случайного поиска, можно говорить лишь о некотором приближении к оптимальному решению, которое теоретически можно было бы получить путем полного перебора значений параметров управляющей стратегии.

На рисунке 4 представлен пример реализации наилучшего варианта параметров управляющей стратегии, полученный в результате эволюционной параметрической оптимизации в течение 9 поколений соответствующих программ. Описание приведенных графиков аналогично описанию выше представленных графиков на рисунке 3. Данный график соответствует первому варианту, т.е. неадаптивному варианту по отношению к выбору набора регрессоров. Слева от указанного

графика, на рисунке 5 приведена зависимость роста выигрыша в зависимости от номера поколения для неадаптивной стратегии.

Аналогичные графики реализации субоптимальной стратегии и зависимости выигрыша от номера поколения для второго варианта, основанного на последовательной коррекции списка регрессоров, приведены, соответственно на рисунках 6 и 7.

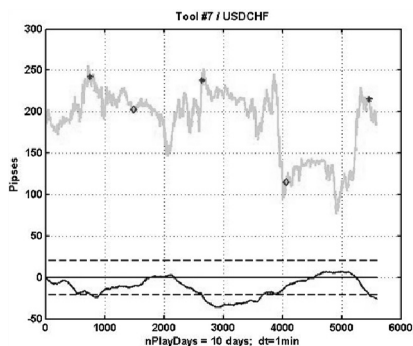


Рис. 4. Пример реализации субоптимальной управляющей стратегии с неадаптивным МР осциллятором

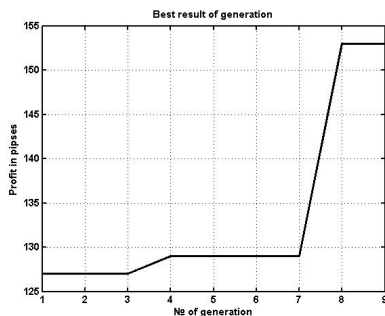


Рис. 5. Зависимость роста выигрыша в зависимости от номера поколения для неадаптивной стратегии

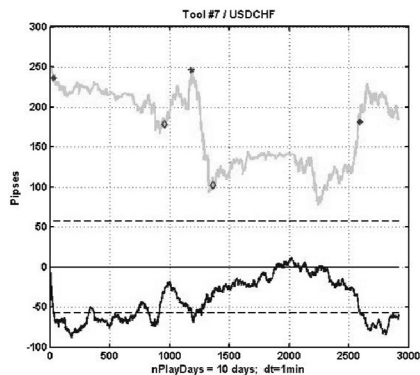


Рис. 6. Пример реализации субоптимальной управляющей стратегии с адаптивным МР осциллятором

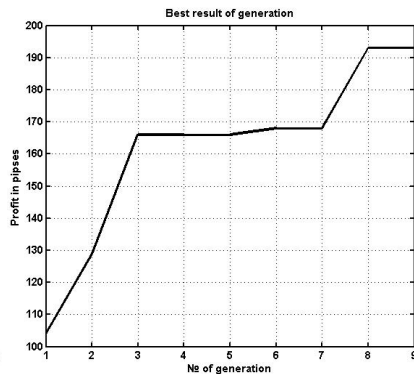


Рис. 7. Зависимость роста выигрыша в зависимости от номера поколения для адаптивной стратегии

Сравнение двух приведенных примеров показывает, что наличие адаптации при выборе группы регрессоров позволяет повысить качество регрессионной оценки и, как следствие, повышает уровень потенциального выигрыша примерно на 27%. Разумеется, отдельный

пример не дает объективной картины выигрыша. Для объективизации результата использовалось усреднение по 100 10-дневным участкам наблюдения котировок.

Заметим, что усреднение по реализациям в данном случае не эквивалентно усреднению по одному участку длиной, равной сумме отдельных реализаций. Это связано с тем, что хаотический процесс динамики котировок не является эргодичным. Поэтому задача воспроизводилась для обеих схем усреднения и показала, что выигрыш от адаптации колеблется в диапазоне 20-25%.

Заметим, что представленные в настоящей работе исследования указывают лишь на возможность повышения качества МР оценки в условиях хаотической динамики. В то же время основанная на ней управляющая стратегия представляет собой традиционный осциллятор со всеми присущими ему достоинствами и недостатками, описанными, например, в [8, 9].

**6. Заключение.** Оценка эффективности адаптационных технологий в задачах построения управляющих стратегий, ориентированных на функционирование в условиях хаотической динамики, является неоднозначной. Это связано с тем, что хаос, в силу своей нестационарности и неэргодичности, не позволяет замкнуть контур адаптации настолько быстро, насколько меняется структура наблюдаемого динамического процесса.

Однако в качестве вспомогательного инструмента, ориентированного на параметры с относительно медленными изменениями, адаптация может оказаться вполне полезной. В частности, как показано в настоящей работе, адаптация к вариациям корреляционной структуры многомерной динамики котировок может повысить качество восстановления стоимости актива, и как следствие, поднять уровень потенциальной эффективности мультирегрессионного осциллятора.

### Литература

1. *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. 288 p.
2. *Williams B.M.* Trading chaos // NY: John Wiley & Sons. 2002. 251 p.
3. *Мусаев А.А.* Моделирование котировок торговых активов // Труды СПИИРАН. 2011. Вып. 17. С. 5–32.
4. *Колодко Д.В.* Нестационарность и самоподобие валютного рынка Forex // Управление экономическими системами. 2012. №3. URL: <http://www.uecs.ru/uecs-39-392012/item/1144—forex> (дата обращения: 26.11.2014).
5. *Афанасьева В.В.* К философскому обоснованию детерминированного хаоса // URL: [http://sbiblio.com/BIBLIO/archive/afanasev\\_k/default.aspx](http://sbiblio.com/BIBLIO/archive/afanasev_k/default.aspx) (дата обращения: 29.11.2014).
6. *Мусаев А.А.* Корреляционный анализ процессов изменения состояния фондовых и валютных рынков // Труды СПИИРАН. 2011. Вып. 18. С. 5–18.

7. *Kendall M.G., Stuart A.* The advanced theory of statistics. V.2. Inference and relationship // London: Ch. Griffin & Company limited. 1968. 899 p.
8. *Colby R.W.* The Encyclopedia of Technical Market Indicators. 2nd Edition // N.Y.: McGraw-Hill. 2003. 832 p.
9. *Мусаев А.А.* Мультирегрессионная оценка стоимости валютного инструмента // Известия СПбГТИ. 2015. №28(54). С. 78–85.
10. *Fogel L.J., Owens A.J., Walsh M.J.* Artificial intelligence through simulated evolution // N.Y.: John Wiley & Sons. 1966. 231 с.
11. *Демиденко Е. З.* Линейная и нелинейная регрессии // М.: Финансы и статистика, 1981. 302 с.
12. *Bolch B.W., Huang, C. J.* Multivariate statistical methods for business and economics // N.J.: Englewood Cliffs. 1974. 317 p.
13. *Мусаев А.А., Барласов И. А.* Оценивание состояния фондовых рынков на основе многомерной регрессии на скользящем окне наблюдения // Труды СПИИРАН. 2012. Вып. 19. С. 243–254.
14. *Аверченков В.И.* Эволюционное моделирование и его применение / В.И. Аверченков, П.В. Казаков. 2-е изд., стереотип // М.: ФЛИНТА. 2011. 200 с.
15. *Курейчик В.М., Гладков Л., Курейчик В.В.* Эволюционное моделирование и генетические алгоритмы // Lambert Academic Publishing. 2011. 260 с.
16. *Карпов В.Э.* Методологические проблемы эволюционных вычислений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. №4. С. 95–102.
17. *Рутковский Л.* Методы и технологии искусственного интеллекта // М.: Горячая линия–Телеком. 2010. 520 с.
18. *Mukhopadhyay A.A., Maulik U., Bandyopadhyay S., Coello C.A.* Survey of Multiobjective Evolutionary Algorithms for Data Mining: Part I // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2014. vol. 18. no. 1. pp. 4–19.
19. *Mukhopadhyay A.A., Maulik U., Bandyopadhyay S., Coello C.A.* Survey of Multiobjective Evolutionary Algorithms for Data Mining: Part II // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2014. vol. 18. no. 1. pp. 20–35.
20. *Мусаев А.А.* Эволюционное моделирование в задаче оптимизации управляющей стратегии // Научный вестник НГТУ. 2014. Т.56. № 3. С. 132–142.

## References

1. 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. 288 p.
2. Williams B.M. Trading chaos. NY: John Wiley & Sons. 2002. 251 p.
3. Musaev A.A. [Modeling of quotations of trade assets]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2011. vol. 17. pp. 5–32. (In Russ.).
4. Kolodko D.V. [Not stationarity and self-similarity of the currency market Forex]. *Upravlenie jekonomicheskimi sistemami - Management of economic systems*. 2012. vol 3. Available at: <http://www.uecs.ru/uecs-39-392012/item/1144--forex>. (accessed 26.11.2014). (In Russ.).
5. Afanasjeva V.V. K filiosfskomu obosnovaniju determinirovannogo haosa [To philosophical justification of the determined chaos]. Available at: [http://sbiblio.com/BIBLIO/archive/afanasev\\_k/default.aspx](http://sbiblio.com/BIBLIO/archive/afanasev_k/default.aspx). (accessed 29.11.2014). (In Russ.).
6. Musaev A.A. [Correlation analysis of processes of share and currency markets changes]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2011. vol. 18. pp. 5–18. (In Russ.).
7. Kendall M.G., Stuart A. The advanced theory of statistics. V.2. Inference and relationship. London: Ch. Griffin & Company limited. 1968. 899 p.
8. Colby R.W. The Encyclopedia of Technical Market Indicators. 2nd Edition. N.Y.: McGraw-Hill. 2003. 832 p.

9. Musaev A.A. [Multiregression estimation of the currency cost]. *Izvestija SPbGTI – SPbSIT News*. 2015. vol. 28(54). pp. 78–85. (In Russ.).
10. Fogel L.J., Owens A.J., Walsh M.J. Artificial intelligence through simulated evolution. N.Y.: John Wiley & Sons. 1966. 231 p.
11. Demidenko E.Z. *Linejnaja i nelinejnaja regressii* [Linear and nonlinear regressions]. Moscow: Finance and statistics. 1981. 302 p. (In Russ.).
12. Bolch B.W., Huang, C. J. Multivariate statistical methods for business and economics. N.J.: Englewood Cliffs. 1974. 317 p.
13. Musaev A.A., Barlasov I. A. [Estimation of stock markets state on the basis of multi-dimensional regression on the sliding watch window]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2012. vol. 19. pp. 243–254. (In Russ.).
14. Avvertchenkov V.I., Kazakov P.V. *Evoljucionnoe modelirovanie i ego primenenie* [Evolutionary modeling and its application]. Moscow: FLINTA. 2011. 200 p.
15. Cureichik V.M., Gladkov L., Cureichik V.V. *Evoljucionnoe modelirovanie and genicheskie algoritmy* [Evolutionary modeling and genetic algorithms]. Lambert Academic Publishing. 2011. 260 p. (In Russ.).
16. Carпов V.E. [Methodological problems of evolutionary calculations]. *Iskusstvennyj intellekt i prinjatje reshenij – Artificial intelligence and decision-making*. 2012. vol. 4. pp. 95–102. (In Russ.).
17. Rutkovsky L. *Metody I tehnologii iskusstvennogo intelekta* [Methods and technologies of artificial intelligence]. Moscow: Hot line–Telecom. 2010. 520 p. (In Russ.).
18. Mukhopadhyay A., Maulik U., Bandyopadhyay S., Coello C. Survey of multiobjective evolutionary algorithms for Data Mining: Part I. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2014. vol. 18. no. 1. pp. 4–19.
19. Mukhopadhyay A., Maulik U., Bandyopadhyay S., Coello C.A. Survey of multiobjective evolutionary algorithms for Data Mining: Part II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2014. vol. 18. no. 1. pp. 20–35.
20. Musaev A.A. [Evolutionary modeling in a problem of the operating strategy optimization]. *Nauchnyj vestnik NGTU – Scientific bulletin NSTU*. 2014. vol. 56. no. 3. pp. 132–142. (In Russ.).

**Мусаев Александр Азерович** — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), декан факультета ИТ и управления, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), научный консультант, ОАО Специализированная инжиниринговая компания «Севзапмонтажавтоматика». Область научных интересов: прикладная статистика, анализ данных, прогнозирование, хаотическая динамика. Число научных публикаций — 220. amusaev@technolog.edu.ru; СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т.: +7-(812)-494-9323, Факс: +7 (812)350-1113.

**Musaev Alexander Azerovich** — Ph.D., Dr. Sci., leading researcher, laboratory of IT in System Analysis and Modeling of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), dean of IT and control systems department, St. Petersburg State Technological Institute (technical university), expert, public corporation Specialized Engineering Company “Sevzapmontageautomatica”. Research interests: data analysis, complicated dynamic processes prognosis and control, stochastic chaos systems. The number of publications — 220. amusaev@technolog.edu.ru; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia, SPIIRAS; office phone: +7-(812)-494-9323, Fax: +7 (812)350-1113.

## РЕФЕРАТ

### **Мусаев А.А. Адаптивная мультирегрессионная оценка в условиях хаотических процессов валютного рынка.**

Главной особенностью динамики котировок на рынках капитала является предельно высокий уровень неопределенности, описываемой теорией хаоса. Однако важнейшей характеристикой хаотической динамики является ее свойство генерировать в себе локальные упорядоченные структуры, простейшими из которых являются локальные тренды. Искусство управления активами сводится к способности трейдера предсказать возникновение тренда и использовать его для формирования управляющей стратегии.

Важным направлением поиска упорядоченных структур в хаосе является анализ взаимных корреляционных связей, т.е. переход в область многомерного анализа данных. Наличие локальных корреляционных связей позволяет формировать скользящие оценки рыночной стоимости валютного актива по совокупности наблюдений котировок связанных с ним валютных инструментов. Текущее значение котировок может существенно отличаться от ее рыночной оценки. Это связано с наличием статистических флуктуаций, обусловленных большим числом полностью или частично неконтролируемых факторов. В этом случае рынок будет стремиться устранить данное несоответствие, что неизбежно предопределяет направление движения котировки актива. Указанное свойство служит основой для построения так называемых *мультирегрессионных* осцилляторов, т.е. индикаторов состояния рынка, основанных на недооценке или переоценке текущей стоимости актива.

Очевидно, что механистический выбор регрессоров, не учитывающий реального уровня их корреляционной связи с активом, существенно снижает эффективность соответствующей управляющей стратегии. В связи с этим в настоящей работе рассмотрена задача оценки текущей стоимости актива на основе группы валютных пар, наиболее коррелированных с указанным валютным активом.

Важно заметить, что корреляционная структура хаотического многомерного процесса нестационарна и неэргодична. Однако ее изменения, в отличие от исходных процессов динамики котировок, достаточно инерционны. Это позволяет перейти к адаптивной схеме, основанной на периодическом пересчете корреляционной матрицы валютного рынка и, при необходимости, изменении состава группы регрессоров.

Оценка эффективности адаптационных технологий в задачах построения управляющих стратегий, ориентированных на функционирование в условиях хаотической динамики, является неоднозначной. Это связано с тем, что хаос, в силу нестационарности и неэргодичности, не позволяет своевременно замкнуть контур адаптивного управления. Однако в качестве вспомогательного инструмента адаптация может оказаться вполне полезной. В частности, адаптация к вариациям корреляционной структуры многомерной динамики котировок может повысить качество восстановления стоимости актива, и как следствие, поднять уровень потенциальной эффективности мультирегрессионного осциллятора.

## SUMMARY

### *Musaev A.A.* **Adaptive Multiregression Currency Estimation in the Chaotic Market Environment.**

The main feature of quotations dynamics in the capital markets is extremely high level of the uncertainty described by the theory of chaos. However the most important characterization of chaotic dynamics is its property to generate in itself the local ordered structures the simplest of which are local trends. The management skill is reduced to of the trader ability to predict a trend emergence and to use it for the operating strategy formation.

The important search direction of ordered structures in chaos is the analysis of mutual correlation relations, i.e. transition to area of the multidimensional data analysis. Existence of local correlation relations allows to form the sliding estimates of a currency values on quotations supervision set of the related currency tools. The current quotations value can significantly differ from its market assessment. It is connected with existence of the statistical fluctuations caused by a large number of unobservable factors. In this case the market will seek to eliminate this discrepancy that will inevitably predetermine the direction of the quotation movement. The specified property forms a basis for creation of so-called multiregression oscillators, i.e. the indicators of the market state based on underestimation or overestimation of the current asset cost.

It is obvious that the mechanistic choice of regressors, which isn't considering the real values of their correlated relation with an asset, significantly reduces efficiency of the corresponding operating strategy. In this regard in the real work the problem of estimation of the current asset cost on the basis of currency group which are most correlated with the specified currency is considered.

It is important to notice that correlation structure of chaotic multidimensional process is a not stationary and not ergodic. However its changes, unlike initial processes of quotations dynamics, are rather inertial. It allows to pass to the adaptive scheme based on periodic recalculation of a correlation matrix of the currency market and, if necessary, change the group of regressors.

The assessment of adaptation technologies efficiency in problems of creation of the operating strategy focused on functioning in the conditions of chaotic dynamics is ambiguous. This results from the fact that the chaos, owing to the not stationary and not ergodic, doesn't allow to close an adaptive control contour in due time. However as the auxiliary tool, adaptation can be quite useful. In particular, adaptation to variations of correlation structure of multidimensional quotations dynamics can to raise quality of asset cost restoration, and as a result, to raise the level of potential efficiency of the multiregression oscillator.