

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И
ИНФОРМАТИКИ
Кафедра теории вероятностей и математической статистики

ПОЛУЗЁРОВ Тимофей Дмитриевич

МОДЕЛИ ДОХОДНОСТЕЙ АКТИВОВ В
СРЕДНЕ-ДИСПЕРСИОННОМ АНАЛИЗЕ МАРКОВИЦА НА
КРИПТОВАЛЮТНЫХ РЫНКАХ

Магистерская диссертация

Научный руководитель
Харин Алексей Юрьевич
доктор физико-математических наук,
профессор

Допущена к защите

«___» _____ 2025 г.

Зав. кафедрой теории вероятностей и математической статистики

_____ А. Ю. Харин

доктор физико-математических наук, профессор

Минск, 2025

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Ключевые слова: ПОРТФЕЛЬНАЯ ТЕОРИЯ, ИНВЕСТИЦИИ, АКТИВЫ, ВАЛЮТЫ, КРИПТОВАЛЮТЫ, СРЕДНЕ-ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ, ДОХОДНОСТЬ, АВТОРЕГРЕССИЯ, МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ, БИРЖА.

Цель работы: исследовать на реальных данных эффективность методов оценки средней ожидаемой доходности в портфельной теории Марковица.

Объект исследования: методы прогнозирования средней доходности, портфельная теория.

Предмет исследования: эффективность методов оценки средней доходности и оценка доходностей соответствующих портфелей.

Методы исследования: методы теории вероятностей, математической статистики и временных рядов, методы регрессионного анализа, методы машинного обучения.

Результаты работы: предложены методы оценки средних доходностей активов. На реальных данных исследованы доходности соответствующих портфелей. Выполнена программная реализация алгоритмов по определению оптимальных портфелей и оценка их доходностей.

Области применения: фондовые, валютные, криптовалютные биржи. Инвестиционные проекты, страхование.

Структура магистерской диссертации: работа изложена на 43 страницах, состоит из общей характеристики на 3 языках, введения, 3 глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Содержит 10 рисунков, 5 таблиц и 1 приложение.

АГУЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Ключавыя словы: ПАРТФЕЛЬНАЯ ТЭОРЫЯ, ІНВЕСТЫЦЫІ, АК-
ТЫВЫ, ВАЛЮТЫ, КРЫПТАВАЛЮТЫ, СЯРЭДНЕ-ДЫСПЕРСІЁННЫ
АНАЛІЗ, ПРАГНАЗІРАВАННЕ ЧАСОВЫХ ШЭРАГАУ, ДАХОДНАСЦЬ,
АУТАРЭГРЭСІЯ, МАШЫННАЕ НАВУЧАННЕ, БІРЖА.

Мэта работы: даследаваць на рэальных дадзеных эфектыўнасць мета-
даў ацэнкі сярэдняй чаканай даходнасці ў партфельнай тэорыі Маркавіца.

Аб'екта даследавання: метады прагназавання сярэдняй даходнасці,
партфельная тэорыя.

Прадмет даследавання: эфектыўнасць метадаў ацэнкі сярэдняй да-
ходнасці і ацэнкі даходнасці адпаведных партфеляў.

Метады даследавання: метады тэорыі верагоднасцей, матэматычнай
статыстыкі і часовых шрагаў, метады рэгрэсійнага аналізу, метады машын-
нага навучання.

Вынікі работы: прапанаваныя метады ацэнкі сярэдніх даходаў акты-
ваў. Па рэальных дадзеных даследаваны даходнасці адпаведных партфеляў.
Выканана праграмная рэалізацыя алгарытмаў па вызначэнні аптымальных
партфеляў і ацэнцы іх даходаў.

Вобласть ўжывання: фондавыя, валютныя, криптовалютныя біржы.
Інвестыцыйныя праекты, страхаванне.

Структура магістэрскай дысертацыі: праца выкладзена на 43 ста-
ронках, складаецца з агульных характарыстык на 3 мовах, увядзенні, 3 гла-
вы, заключэнні, спісы выкарыстаных крыніц і дадаткаў. Змяшчае 10 малюн-
каў, 5 табліцу і 1 дадатак.

GENERAL DESCRIPTION OF WORK

Keywords: PORTFOLIO THEORY, INVESTMENTS, ASSETS, CURRENCIES, CRYPTOCURRENCIES, MEAN-VARIANCE ANALYSIS, TIME SERIES FORECASTING, RETURN, AUTOREGRESSION, MACHINE LEARNING, STOCK EXCHANGE.

The aim: to investigate the effectiveness of methods for estimating the average expected return in Markowitz's portfolio theory on real data.

The object: methods for forecasting average returns, portfolio theory.

Research methods: methods of probability theory, mathematical statistics and time series, methods of regression analysis, methods of machine learning.

The results: Methods for estimating average assets returns are proposed. The returns of the corresponding portfolios are studied using real data. A software implementation of algorithms for determining optimal portfolios and estimating their returns is completed.

Application: stock, currency, cryptocurrency exchanges. Investment projects, insurance.

Structure of a Master's Thesis: the work is presented on 43 pages, consists of a general description in 3 languages, an introduction, 3 chapters, a conclusion, a list of references and an appendix. Contains 10 figures, 5 tables and 1 appendix.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	2
АГУЛЬНАЯ ХАРАКТЫРЫСТЫКА РАБОТЫ	3
GENERAL DESCRIPTION OF WORK	4
ВВЕДЕНИЕ	6
1. СРЕДНЕ-ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ ПОРТФЕЛЯ . . .	8
1.1. Основные понятия	8
1.2. Постановка задачи поиска оптимального портфеля	9
1.3. Сведение к доходностям	11
1.4. Оптимизационная задача	13
1.5. Диверсификация портфеля	14
2. МОДЕЛИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ	18
2.1. Общий подход к прогнозированию рядов	18
2.2. Линейная регрессия	20
2.3. Случайный лес	21
2.4. ARIMA	23
3. ПРОВЕРКА СТРАТЕГИЙ НА РЫНОЧНЫХ ДАННЫХ . .	25
3.1. Подготовка данных	25
3.2. Оценка ковариации между активами	30
3.3. Модели оценки средней доходности	31
3.4. Оценка доходностей стратегий	33
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	36
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	37
ПРИЛОЖЕНИЕ А	38

ВВЕДЕНИЕ

Портфельная теория Марковица дает точный ответ на вопрос выбора портфеля, если известны математическое ожидание и ковариации случайных величин, описывающих доходности активов за будущий период инвестирования. На практике, конечно, эти значения неизвестны и их приходится их оценивать (прогнозировать). В финансовой математике уже были разработаны модели оценки характеристик будущих доходностей.

Модель CAPM (Capital Asset Pricing Model), разработанная У.Шарпом и Дж.Линтером [13], [9], которая базируется на концепции равновесного рынка, моделирует линейную зависимость между доходностями активов и «большим рынком», например, рыночным индексом.

Более современная теория — теория APT (Arbitrage Pricing Theory) С. Росса и Р.Ролла [12], [11], исходящая из многофакторной модели зависимости доходности активов от некоторых факторов (необязательно рыночных). Эта теория опирается на концепцию отсутствия асимптотического арбитража.

В этой работе приводится альтернативный подход к оценке нужных характеристик. Имея в распоряжении историю наблюдений за ценами активов можно поставить задачу спрогнозировать будущие цены на основании предыдущей динамики. Для решения этой задачи можно применить современные методы прогнозирования временных рядов. К таким методам относятся: классические статистические модели, модели машинного обучения, модели временных рядов.

Идеи портфельной теории можно применить не только к выбору портфеля акций. Например, когда отдельный человек, желая сохранить свой капитал, принимает решение о том как разместить деньги по депозитам, купить валюту, страховку и так далее. А учитывая растущую популярность криптовалют в последнее время, особенный интерес представляет применение теории в этой области.

Криптовалюта — это альтернативный вид валюты в цифровой или виртуальной форме, для защиты транзакций используется криптография. В 2009 году был создан первый криптовалютный токен — Bitcoin. Принципы его работы были описаны в статье [10]. Далее выпускались и другие токены, например Ethereum, Litecoin. Торговля токенами ведется в интернете на специализированных биржах. Криптовалютные биржи устроены по тем же принципам что

и фондовые и валютные биржи. Поведение цен на криптовалюты структурно отличается от поведения цен на обыкновенные акции. Цены криптовалют склонны к очень резким скачкам и как правило в них отсутствует долгосрочный тренд. Динамика цен более волатильная, причем волатильность не постоянна во времени. Цифровизация торговли позволяет иметь моментальный доступ к котировкам и вести активную торговлю. Это дает возможность трейдерам заниматься спекуляциями, а инвесторам — возможность среднесрочного и долгосрочного инвестирования.

В этой работе усовершенствуется подхода Марковица путем использования продвинутых методов прогнозирования временных рядов для оценки будущих доходностей. Теоретические модели адаптируются для формирования однопериодных торговых стратегий на криптовалютном рынке. Доходность полученных стратегий проверяется на реальных данных. Также рассматривается вопрос диверсификации портфеля и контроля риска.

1. СРЕДНЕ-ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ ПОРТФЕЛЯ

В этой главе определяются основные понятия инвестирования и средне-дисперсионного анализа. Формулируется задача поиска оптимального портфеля.

1.1. Основные понятия

Портфельный анализ берет свое начало с выхода статьи Гарри Марковица в 1952 г [8]. Подход Марковица начинается с предположения что инвестор в настоящий момент времени имеет конкретную сумму денег для инвестирования. Эти деньги будут инвестированы на определенный промежуток времени, который называется **периодом инвестирования**. В конце периода инвестор продает активы купленные в ранее. Набор приобретенных активов иначе называют **инвестиционным портфелем**. Поэтому проблема выбора и распределения средств по активам имеет название **проблемой выбора инвестиционного портфеля**.

Пусть цены актива на начало и конец периода инвестирования равны S^0 и S^1 соответственно. Определим **доходность актива** (Return) r за период инвестирования как

$$r = \frac{S^1 - S^0}{S^0}$$

При формировании портфеля в начальный момент времени, инвестор должен иметь в виду, что доходность активов за будущий период владения заранее не известна. То есть, он вынужден принимать решение о выборе портфеля исходя из своих ожидаемых доходностей активов.

Если инвестор ставит задачей максимизировать доходность портфеля, то в этом случае его портфель должен состоять из единственного актива с наибольшей ожидаемой доходностью. Марковиц отмечает, что такой подход не является разумным, потому что типичный инвестор хоть и желает чтобы «доходность была высокой», но одновременно требует чтобы «доходность была настолько определенной насколько это возможно». Это означает, что инвестор, стремясь одновременно максимизировать доходность и минимизировать риск (неопределенность), имеет две противоречащие друг другу цели. Под-

ход Марковия к принятию решения дает возможность адекватно учесть обе эти цели.

Имея N доступных активов можно сформировать бесконечно много портфелей. Это множество называют **достижимым**. Как инвестору в этих условиях выбрать портфель? Логичными являются следующие принципы при формировании портфеля:

- Из двух портфелей с одинаковым риском, инвестор выберет портфель с большей ожидаемой доходностью
- Из двух портфелей с одинаковой доходностью, инвестор выберет портфель с меньшим риском

Другими словами, из достижимого множества портфелей инвестор склонен выбирать парето-оптимальные портфели. Множество оптимальных портфелей иначе называют **эффективным множеством**. Достижимые портфели не из эффективного множества называют **неэффективными портфелями**.

Вопрос выбора конкретного портфеля из эффективного множества остается на стороне инвестора. Здесь он уже руководствуется своей внутренней толерантностью к риску. Обычно достаточно зафиксировать приемлимый уровень риска внутри достижимого множества и выбрать портфель с соответствующей доходностью.

1.2. Постановка задачи поиска оптимального портфеля

Будем рассматривать одношаговую задачу инвестирования. Инвестор собирает портфель по рыночным ценам активов S^0 стоимостью x в момент времени $n = 0$, а момент времени $n = 1$ этот портфель продается по рыночным ценам S^1 .

Пусть инвестору доступно инвестирование в N активов и начальный капитал x . Цены активов в начальный момент времени $n = 0$ равны S_1^0, \dots, S_N^0

Обозначим

$$b = (b_1, \dots, b_N), b_i \geq 0 \quad (1.1)$$

$i = \overline{1, N}$ число активов которые преобрел инвестор.

Тогда стоимость портфеля в начальный момент времени равна

$$X^0 = b_1 S_1^0 + \dots + b_N S_N^0 \quad (1.2)$$

Иначе говоря, b есть портфель ценных бумаг, где b_i — число i -х акций, приобретенных по цене S_i^0 .

Будущие цены акций в момент времени $n = 1$ равны S_1^1, \dots, S_N^1 . Их можно представить в терминах доходностей r_i используя начальные цены

$$S_i^1 = (1 + r_i) S_i^0, i = \overline{1, N} \quad (1.3)$$

Здесь r_i являются случайными величинами.

Если инвестор сформировал портфель $b = (b_1, \dots, b_N)$, то его начальный капитал $X^0 = x$ превратится в

$$X^1 = b_1 S_1^1 + \dots + b_N S_N^1, \quad (1.4)$$

Таким образом, стоимость портфеля на конец периода инвестирования является случайной величиной. Она определяется набором случайных величин — будущими доходностями активов, и тем как инвестор распределил капитал по доступным активам. Если на первое повлиять невозможно, то второе полностью определяется инвестором. В его интересах собрать такой портфель, цена которого будет «побольше» и с высокой уверенностью. Это стремление максимизировать прибыль и минимизировать риск (неопределенность), Марковиц формулирует в терминах математического ожидания $\mathbb{E} [X^1]$ и дисперсии $\mathbb{D} [X^1]$ случайной величины X^1 .

Имея эти две характеристики, можно по-разному формулировать оптимизационную задачу выбора наилучшего портфеля в зависимости от критерия оптимальности.

Можно, например, задаться вопросом о том, на каком портфеле b^* достигается максимум некоторой целевой функции $f = f(\mathbb{E} [X^1], \mathbb{D} [X^1])$ при «бюджетном ограничении» на класс допустимых портфелей:

$$B(x) = \{b = (b_1, \dots, b_N) : b_i \geq 0, X_0(b) = x\}, x > 0 \quad (1.5)$$

Задача, сформулированная в этом разделе, допускает записи в более

удобном виде. А именно, перейти от абсолютных цен к доходностям.

1.3. Сведение к доходностям

Сформулированная задача позволяет работать не с будущими ценами активов S_1^1, \dots, S_N^1 , а с доходностями r_1, \dots, r_N .

Перейдем от величин $b = (b_1, \dots, b_N)$ к величинам $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_N)$, которые определим как

$$\omega_i = \frac{b_i S_i^0}{x} \quad (1.6)$$

причем $\omega_i \geq 0, i = \overline{1, N}$ и

$$\sum_{i=1}^N \omega_i = \sum_{i=1}^N \frac{b_i S_i^0}{x} = \frac{1}{x} \sum_{i=1}^N b_i S_i^0 = \frac{X^0}{x} = 1 \quad (1.7)$$

Таким образом, ω есть не что иное как доли капитала, инвестируемые в соответствующие активы.

Рассмотрим цену портфеля в момент времени $n = 1$. Доходность всего портфеля обозначим через R . Тогда

$$X^1 = (1 + R)X^0 \quad (1.8)$$

$$R = \frac{X^1}{X^0} - 1 = \frac{X^1}{x} - 1 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N b_i S_i^1}{x} \right) - 1 = \left(\sum_{i=1}^N \omega_i \frac{S_i^1}{S_i^0} \right) - 1 = \quad (1.9)$$

$$= \left(\sum_{i=1}^N \omega_i \frac{S_i^1}{S_i^0} \right) - \sum_{i=1}^N \omega_i = \sum_{i=1}^N \omega_i \frac{S_i^1}{S_i^0} - \omega_i = \sum_{i=1}^N \omega_i \left(\frac{S_i^1}{S_i^0} - 1 \right) = \quad (1.10)$$

$$= \sum_{i=1}^N \omega_i r_i \quad (1.11)$$

Доходность всего портфеля определяется как смесь случайных величин — доходностей активов входящих в портфель.

$$\mathbb{E}[R] = \mathbb{E}\left[\sum_{i=1}^N \omega_i r_i\right] = \sum_{i=1}^N \omega_i \mathbb{E}[r_i] \quad (1.12)$$

$$\mathbb{D}[R] = \mathbb{D}\left[\sum_{i=1}^N \omega_i r_i\right] = \sum_{i=1}^N \omega_i^2 \mathbb{D}[r_i] + \sum_{i=1, j=1, i \neq j}^N \omega_i \omega_j \mathbf{Cov}(r_i, r_j) \quad (1.13)$$

Уравнения 1.12 и 1.13 удобно переписать в матричном виде.

Пусть

$$r = (r_1, \dots, r_N) \in \mathbb{R}^N \quad (1.14)$$

— вектор-столбец доходностей активов (случайный вектор).

Математическое ожидание доходностей

$$\mu = \mathbb{E}[r] = (\mathbb{E}[r_1], \dots, \mathbb{E}[r_N]) \quad (1.15)$$

и матрица ковариаций

$$\Sigma = \{\sigma_{ij} = \mathbf{Cov}(r_i, r_j)\}_{i=1, j=1}^{N, N} \in \mathbb{R}^{N \times N} \quad (1.16)$$

распределение капитала по активам

$$\omega = (\omega_1, \dots, \omega_N) \in \mathbb{R}^N \quad (1.17)$$

Доходность портфеля (случайная величина) есть

$$R = \omega^T r \quad (1.18)$$

Математическое ожидание доходности портфеля обозначим μ_X

$$\mu_X = \mathbb{E}[R] = \mathbb{E}[\omega^T r] = \omega^T \mu \quad (1.19)$$

а дисперсию σ_X^2

$$\sigma_X^2 = \mathbb{D}[R] = \mathbb{D}[\omega^T r] = \omega^T \Sigma \omega \quad (1.20)$$

Полученные матричные обозначения позволяют удобно сформулировать задачу оптимизации. Причем эту задачу можно ставить в различных постановках.

1.4. Оптимизационная задача

Предположим, что нам известны математические ожидания μ и ковариации Σ доходностей активов за период инвестирования. На практике, конечно же, эти величины не известны и их приходится оценивать. Но в этом пункте сфокусируемся на постановке и решении оптимизационной задачи при известных входных данных.

Для удобства матричных записей используется обозначение $e = (1, \dots, 1) \in \mathbb{R}^N$ — единичный вектор-столбец.

В качестве целевой функции возьмем линейную комбинацию доходности и риска портфеля. Для этого введем риск-параметр τ .

$$f(\mu_X, \sigma_X^2) = \tau \omega^T \Sigma \omega - \omega^T \mu \rightarrow \min_{\omega} \quad (1.21)$$

Используя риск-параметр $\tau \in [0, +\infty]$, оптимизационную задачу можно сформулировать в следующем виде

$$\begin{cases} \tau \omega^T \Sigma \omega - \omega^T \mu \rightarrow \min_{\omega} \\ \omega^T e = 1 \\ \omega \geq 0 \end{cases} \quad (1.22)$$

Множество решений при различных значениях τ образуют эффективное множество портфелей. При $\tau = 0$ имеем портфель минимального риска.

Альтернативно можно записать оптимизационную задачу когда риск

портфеля нужно зафиксировать на определенном уровне

$$\begin{cases} -\omega^T \mu \rightarrow \min_{\omega} \\ \omega^T \Sigma \omega \leq \sigma_X^2 \\ \omega^T e = 1 \\ \omega \geq 0 \end{cases} \quad (1.23)$$

Аналогично, если требуется зафиксировать определенную доходность

$$\begin{cases} \omega^T \Sigma \omega \rightarrow \min_{\omega} \\ \omega^T \mu \geq \mu_X \\ \omega^T e = 1 \\ \omega \geq 0 \end{cases} \quad (1.24)$$

Полученные задачи решаются с помощью хорошо изученных методов квадратичного программирования.

Конечно, на практике распределения будущих доходностей, или хотябы их характеристики неизвестны. Поэтому для применения портфельной теории требуется оценить среднее и ковариацию будущих доходностей. На основании истории наблюдений за доходностями активов можно построить прогноз необходимых характеристик и решать оптимизационную задачу.

Еще одним важным понятием в портфельной теории является диверсификация. Прежде чем переходить к рассмотрению методов оценки будущих доходностей, рассмотрим как с помощью диверсификации можно редуцировать риск портфеля.

1.5. Диверсификация портфеля

Обратимся теперь к вопросу о том, как диверсификацией можно добиться снижения риска, измеряемого дисперсией или стандартным отклонением величины R .

С этой целью рассмотрим для начала пару случайных величин ξ_1 и ξ_2 с конечными вторыми моментами. Тогда если c_1 и c_2 – константы, $\sigma_i =$

$\sqrt{\mathbb{D}[\xi_i]}, i = 1, 2$, то

$$\mathbb{D}[c_1\xi_1 + c_2\xi_2] = (c_1\sigma_1 - c_2\sigma_2)^2 + 2c_1c_2\sigma_1\sigma_2(1 + \sigma_{12}), \quad (1.25)$$

где $\sigma_{12} = \frac{\mathbf{Cov}(\xi_1, \xi_2)}{\sigma_1\sigma_2}$, $\mathbf{Cov}(\xi_1, \xi_2) = \mathbb{E}[\xi_1\xi_2] - \mathbb{E}[\xi_1] \cdot \mathbb{E}[\xi_2]$. Отсюда ясно, что если $c_1\sigma_1 = c_2\sigma_2$ и $\sigma_{12} = -1$, то $\mathbb{D}[c_1\xi_1 + c_2\xi_2] = 0$.

Таким образом, если величины ξ_1 и ξ_2 отрицательно коррелированы с коэффициентом корреляции $\sigma_{12} = -1$, то таким подбором констант c_1 и c_2 , что $c_1\sigma_1 = c_2\sigma_2$, получаем комбинацию $c_1\xi_1 + c_2\xi_2$ с нулевой дисперсией. Но, конечно, при этом среднее значение $\mathbb{E}[c_1\xi_1 + c_2\xi_2]$ может оказаться достаточно малым. (Случай $c_1 = c_2 = 0$ для задачи оптимизации не интересен в силу условия $b \in B(X)$).

Из этих элементарных рассуждений ясно, что при заданных ограничениях на (c_1, c_2) и класс величин (ξ_1, ξ_2) при решении задачи о том, чтобы сделать $\mathbb{E}[c_1\xi_1 + c_2\xi_2]$ «побольше», а $\mathbb{D}[c_1\xi_1 + c_2\xi_2]$ «поменьше», надо стремиться к выбору таких пар (ξ_1, ξ_2) , для которых их ковариация была бы как можно ближе к минус единице.

Изложенный эффект отрицательной коррелированности, называемый эффектом Марковица, является одной из основных идей диверсификации при инвестировании — при составлении портфеля ценных бумаг надо стремиться к тому, чтобы вложения делались в бумаги, среди которых по возможности много отрицательно коррелированных.

Другая идея, лежащая в основе диверсификации, основана на следующем соображении.

Пусть ξ_1, \dots, ξ_N — последовательность некоррелированных случайных величин с дисперсиями $\mathbb{D}[\xi_i] \leq C, i = 1, \dots, N$, где C — некоторая константа. Тогда

$$\mathbb{D}[\omega_1\xi_1 + \dots + \omega_N\xi_N] = \sum_{i=1}^N \omega_i^2 \mathbb{D}[\xi_i] \leq C \sum_{i=1}^N \omega_i^2. \quad (1.26)$$

Поэтому, взяв, например, $\omega_i = \frac{1}{N}$, находим, что

$$\mathbb{D}[\omega_1\xi_1 + \dots + \omega_N\xi_N] \leq \frac{C}{N} \rightarrow 0, N \rightarrow \infty \quad (1.27)$$

Этот эффект некоррелированности говорит о том, что если инвестирование производится в некоррелированные ценные бумаги, то для уменьшения риска $\mathbb{D}[\omega_1\xi_1 + \dots + \omega_N\xi_N]$, надо по возможности брать их число N как можно большим.

Вернемся к вопросу о дисперсии $\mathbb{D}[R]$ величины

$$R = \omega_1 r_1 + \dots + \omega_N r_N \quad (1.28)$$

Имеем

$$\mathbb{D}[R] = \sum_{i=1}^N \omega_i^2 \mathbb{D}[r_i] + \sum_{i,j=1, i \neq j}^N \omega_i \omega_j \mathbf{Cov}(r_i, r_j) \quad (1.29)$$

Возьмем здесь $\omega_i = \frac{1}{N}$. Тогда

$$\sum_{i=1}^N \omega_i^2 \mathbb{D}[r_i] = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N^2} \mathbb{D}[r_i] = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \mathbb{D}[r_i] = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbb{D}[r_i] = \quad (1.30)$$

$$= \frac{1}{N} \cdot \bar{\sigma}_N^2, \quad (1.31)$$

где $\bar{\sigma}_N^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbb{D}[r_i]$ — средняя дисперсия.

Далее,

$$\sum_{i,j=1, i \neq j}^N \omega_i \omega_j \mathbf{Cov}(r_i, r_j) = \frac{1}{N^2} \cdot \sum_{i,j=1, i \neq j}^N \mathbf{Cov}(r_i, r_j) = \quad (1.32)$$

$$= \frac{1}{N^2} \cdot N(N-1) \cdot \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j=1, i \neq j}^N \mathbf{Cov}(r_i, r_j) = \quad (1.33)$$

$$= \frac{N-1}{N} \cdot \overline{\mathbf{Cov}}_N \quad (1.34)$$

где $\overline{\mathbf{Cov}}_N$ есть средняя ковариация

$$\overline{\mathbf{Cov}}_N = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j=1, i \neq j}^N \mathbf{Cov}(r_i, r_j). \quad (1.35)$$

Таким образом,

$$\mathbb{D}[R] = \frac{1}{N} \cdot \bar{\sigma}_N^2 + \left(1 - \frac{1}{N}\right) \cdot \overline{\mathbf{Cov}}_N, \quad (1.36)$$

и ясно, что если $\bar{\sigma}_N^2 \leq C$ и $\overline{\mathbf{Cov}}_N \rightarrow \overline{\mathbf{Cov}}$ при $N \rightarrow \infty$, то

$$\mathbb{D}[R] \rightarrow \overline{\mathbf{Cov}}, N \rightarrow \infty. \quad (1.37)$$

Из этой формулы мы видим, что если $\overline{\mathbf{Cov}}$ равна нулю, то диверсификацией с достаточно большим N риск инвестирования $\mathbb{D}[R]$, может быть сделан сколь угодно малым. К сожалению, на практике, как правило, имеется положительная корреляция в ценах (они движутся довольно-таки согласованно в одном направлении), что приводит к тому, что $\overline{\mathbf{Cov}}_N$ не стремится к нулю при $N \rightarrow \infty$. Предельное значение $\overline{\mathbf{Cov}}$ и есть тот систематический, иначе — рыночный — риск, который присущ рассматриваемому рынку и диверсификацией не может быть редуцирован. Первый же член в формуле 1.36 определяет несистематический риск, который может быть редуцирован, как мы видели, выбором большого числа акций.

2. МОДЕЛИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

В этой главе будут рассмотрены некоторые модели временных рядов с помощью которых можно решать задачу прогнозирования ожидаемой доходности активов. Проверка на реальных данных качества прогнозирования и доходностей портфелей, построенных с использованием рассматриваемых моделей, будет приведена в главе 3.

2.1. Общий подход к прогнозированию рядов

Процесс прогнозирования заключается в оценке будущего значения временного ряда либо путем моделирования ряда исключительно на основе его прошлого поведения (авторегрессия), либо путем включения других внешних переменных.

Чтобы применить модели машинного обучения к задачам прогнозирования, временной ряд необходимо преобразовать в матрицу, где каждое значение связано с определенным предыдущим значением ряда (лагом). В контексте временного ряда, лаг относительно момента времени t определяется как значение ряда на предыдущих временных шагах. Например, лаг 1 представляет значение на временном шаге $t - 1$, тогда как лаг m представляет значение на временном шаге $t - m$.

Это преобразование необходимо для моделей машинного обучения для захвата зависимостей и закономерностей, которые существуют между прошлыми и будущими значениями во временном ряду. Используя лаги в качестве входных признаков, модели машинного обучения могут учиться на прошлом и делать прогнозы относительно будущих значений. Количество лагов, используемых в качестве входных признаков в матрице, является важным гиперпараметром, который необходимо тщательно настраивать для получения наилучшей производительности модели.

Модели машинного обучения в основном заточены на решение табличных задач. Однако, они несложным образом адаптируются для прогнозирования временных рядов. Признаки формируются как лаги временного ряда. Процесс формирования матрицы объекты-признаки схематично показан на рисунке 2.1.

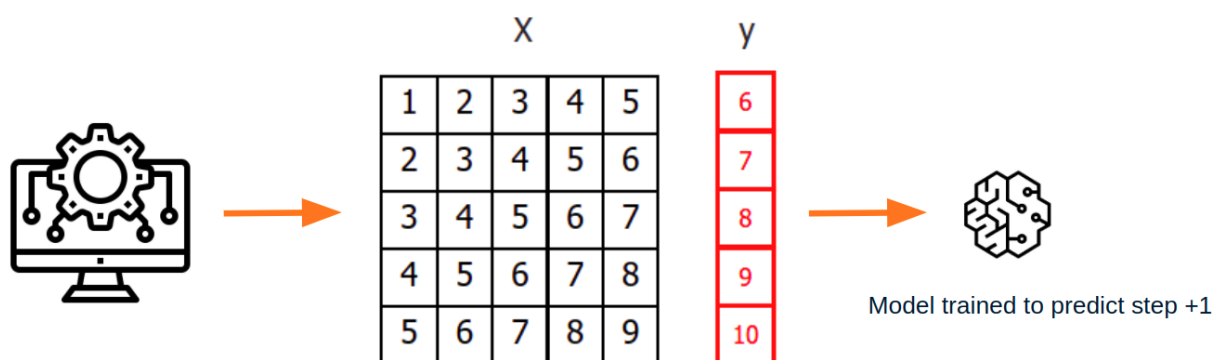


Рис. 2.1. Матрица объекты-признаки

После того, как данные были перестроены в новую форму, любая регрессионная модель может быть обучена прогнозировать следующее значение (шаг) ряда. Во время обучения модели каждая строка считается отдельным экземпляром данных, где значения на лагах $1, 2, \dots, p$ считаются предикторами для целевого количества временного ряда на временном шаге $p + 1$.

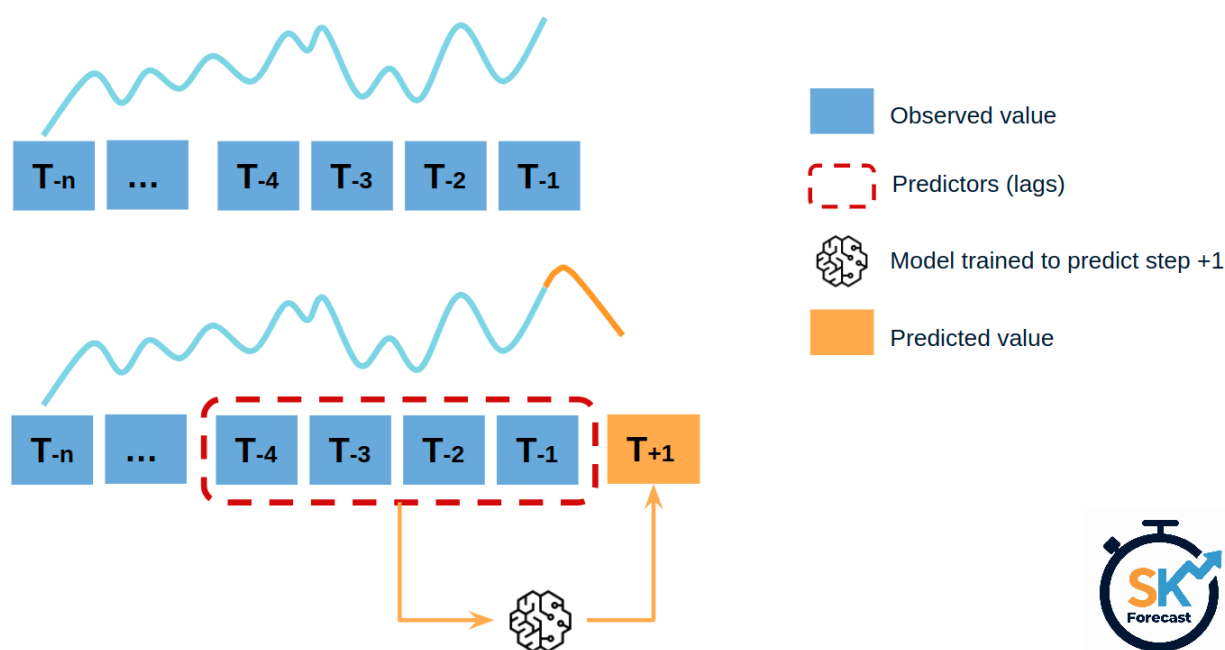


Рис. 2.2. Формирование признаков как временных лагов ряда

В прогнозировании временных рядов процесс бэктестинга заключается в оценке производительности предсказательной модели путем ее ретроспективного применения к историческим данным. Таким образом, это особый тип перекрестной проверки, применяемый к предыдущим периодам.

Цель бэктестинга — оценить точность и эффективность модели. Прове-

ряя модель на исторических данных, можно оценить насколько хорошо она работает на данных, которые она ранее не видела. Это важный шаг в процессе моделирования, поскольку он помогает гарантировать, что модель является надежной и устойчивой.

Бэктестинг можно проводить с использованием различных методов, таких как простые разделения обучения и тестирования или более сложные методы, такие как скользящие окна или расширяющиеся окна. Выбор метода зависит от конкретных потребностей анализа и характеристик данных временных рядов.

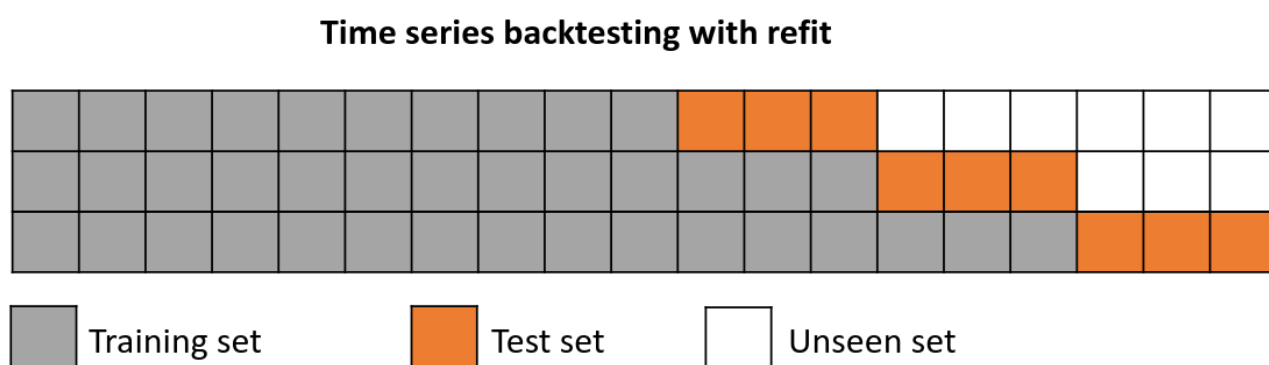


Рис. 2.3. Формирование выборок при бектестинге

Будем использовать подход с расширением обучающего множества и переобучением на каждом шаге. При таком подходе модель обучается перед каждым прогнозированием, и все доступные данные на тот момент используются в процессе обучения. Это отличается от стандартной перекрестной проверки, где данные случайным образом распределяются между обучающими и проверочными наборами.

Вместо рандомизации данных этот бэктестинг последовательно увеличивает размер обучающего набора, сохраняя временной порядок данных. Благодаря этому модель можно тестировать на все больших объемах исторических данных, что обеспечивает более точную оценку ее качества прогнозирования.

2.2. Линейная регрессия

Пусть X и Y матрица объектов-признаков и вектор целевых значений, построенные по историческим данным.

Линейная регрессия есть линейная комбинация признаков (лагов) x и весов w .

$$a(x) = w_0 + w_1x_1 + \dots + w_nx_n = \langle x, w \rangle \quad (2.1)$$

Решение w^* находится методом наименьших квадратов. Определим функционал потерь как средний квадрат ошибки модели на всех элементах выборки.

$$Q(a) = \frac{1}{\ell} \sum_{i=1}^{\ell} (y_i - a(x_i))^2 = \|Xw - y\|^2 \quad (2.2)$$

Необходимое условие минимума

$$\frac{\partial Q}{\partial w} = 2X^T(Xw - y) = 0 \quad (2.3)$$

Решая систему уравнений получим аналитический вид решения оптимизационной задачи

$$w^* = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2.4)$$

Огромным преимуществом данной модели является её простота и скорость обучения. Также веса модели можно интерпретировать. Большие абсолютные значения весов означают сильный вклад соответствующих лагов в целевую переменную. Далее перейдем к рассмотрению более сложных моделей.

2.3. Случайный лес

Алгоритм случайного леса есть простое голосование над решающими деревьями. Он является одним из сильнейших алгоритмов машинного обучения. Описывается основная идея работы алгоритма, а более подробно об этом алгоритме написано в статье [7].

Дерево решений есть бинарное дерево. Определены вершины двух типов:

- внутренние — содержит предикат $b_v : \mathbb{X} \rightarrow \{0, 1\}$
- листовые — хранит выходное значение $c_v \in \mathbb{Y}$

Этапы обработки деревом входящего объекта x

1. Стартуем из корня
2. Вычисляем текущий предикат $b_v(x)$
3. Если $b_v(x) = 0$ то делаем шаг в левое поддерево, иначе — в правое
4. Пока не дошли до листовой вершины, повторяем шаги 2 и 3
5. Возвращаем значение c_v в листе

В качестве базовых алгоритмов выберем набор решающих деревьев b_1, \dots, b_k . Объединим результаты работы базовых алгоритмов с помощью простого голосования

$$a(x) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k b_i(x) \quad (2.5)$$

Ошибку работы ансамбля можно разложить на 3 компоненты

$$Q(a) = \textit{bias}(a) + \textit{variance}(a) + \textit{noie} \quad (2.6)$$

где

$$\textit{bias}(a) = f(x) - \mathbb{E}_X [a(x, X)] \quad (2.7)$$

$$(2.8)$$

— смещение алгоритма,

$$\textit{variance}(a) = \mathbb{E}_X [a(x, X)] - \mathbb{E}_X [a(x, X)]^2 \quad (2.9)$$

$$(2.10)$$

— разброс алгоритма,

$$\textit{noie} = \mathbb{E}_X \left[\mathbb{E}_\varepsilon \left[(y(x, \varepsilon) - f(x))^2 \right] \right] \quad (2.11)$$

— неустранимый шум.

Смещение ансамбля определяется смещением базового алгоритма. По-

этому разумно строить неглубокие деревья.

$$\text{bias}(a) = f(x) - \mathbb{E}_X [a(x, X)] = \quad (2.12)$$

$$= f(x) - \mathbb{E}_X \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k b(x, X^i) \right] = \quad (2.13)$$

$$= f(x) - \mathbb{E}_X [b(x, X)] = \quad (2.14)$$

$$= \text{bias}_X(b) \quad (2.15)$$

Разброс ансамбля определяется числом базовых алгоритмов в нем и корреляциями между ними. Постараемся добиться некоррелированности, или, по крайней мере, непохожести базовых алгоритмов за счет обучения каждого из них на разных данных. С этим помогает идея бутстрапирования.

$$\text{variance}(a) = \mathbb{E}_X [a(x, X) - \mathbb{E}_x [a(x, X)]]^2 = \quad (2.16)$$

$$= \mathbb{E}_X \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k b_i - \mathbb{E}_X \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k b_i \right] \right]^2 = \quad (2.17)$$

$$= \frac{1}{k^2} \mathbb{E}_X \left[\sum_{i=1}^k (b_i - \mathbb{E}_X [b_i]) \right]^2 = \quad (2.18)$$

$$= \frac{1}{k^2} \sum_{i=1}^k \text{variance}_X(b_i) + \frac{1}{k^2} \sum_{i \neq j} \text{Cov}(b_i, b_j) \quad (2.19)$$

Помимо алгоритмов машинного обучения для прогнозирования временных рядов можно воспользоваться классическими моделями временных рядов. Одной из них является модель ARIMA.

2.4. ARIMA

Модель ARIMA обобщает модель ARMA. Подробно работа модели описывается здесь [5].

Модель $ARMA(p, q)$ сочетает в себе модели авторегрессии $AR(p)$ и скользящего среднего $MA(q)$.

Пусть задано фильтрованное вероятностное пространство $(\Omega, \mathcal{F}, (\mathcal{F}_n), P)$

Будем считать что $\mathcal{F}_n = \sigma(\dots, \varepsilon_{-1}, \varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$ с белым шумом $\varepsilon = (\varepsilon_n)$.

По определению, последовательность $x = (x_n)$ является ARMA-моделью, если

$$x_n = \mu_n + \sigma \varepsilon_n \quad (2.20)$$

где

$$\mu_n = (a_0 + a_1 x_{n-1} + \dots + a_p x_{n-p}) + (b_1 \varepsilon_{n-1} + b_2 \varepsilon_{n-2} + \dots + b_q \varepsilon_{n-q}) \quad (2.21)$$

Эта модель допускает обобщение на случай когда исходный ряд не стационарен. А именно, рассмотрим разности процесса x

$$\Delta x_n = x_n - x_{n-1} \quad (2.22)$$

Повторяя операцию взятия разности d раз, получим процесс $\Delta^d x = (\Delta^d x_n)$. Если полученный процесс «более стационарный» чем исходный, то построим уже для него $ARMA(p, q)$ модель.

Описанная модель есть трехпараметрическая модель временного ряда $ARIMA(p, d, q)$. Символически это можно записать

$$\Delta^d ARIMA(p, d, q) = ARMA(p, q) \quad (2.23)$$

В этой главе были рассмотрены некоторые алгоритмы построения моделей временных рядов позволяющие строить прогноз будущих значений на основании истории ряда. Применение эти модели для оценки будущих средних доходностей в теории Марковица, позволяет строить множества оптимальных портфелей. Перейдем к построению и оценке инвестиционных стратегий, основанных на рассмотренных моделях.

3. ПРОВЕРКА СТРАТЕГИЙ НА РЫНОЧНЫХ ДАННЫХ

В этой главе оценивается качество моделей для прогнозирования ожидаемых средних доходностей и оцениваются доходности соответствующих торговых стратегий. Под стратегией понимается построенный на определенный момент времени и с определенным сроком инвестирования портфель. Рассматриваются стратегии двух типов. Тривиальные, когда капитал инвестируется в один отдельный актив или в весь рынок одновременно, и стратегии, основанные на теории Марковица, где для оценки средней ожидаемой доходности используется некоторая модель из главы 2.

3.1. Подготовка данных

Рыночные данные были выгружены с помощью API с криптовалютной биржи OKX [3]. В качестве доступных для торговли активов рассматриваются 8 наиболее популярных криптовалют. Временной период с 1 января 2022 по 1 января 2025. Был выбран дневной таймфрейм. Период инвестирования 1 неделя.

На графике 3.1 изображены динамики цен активов.

Перейдем от цен к недельным доходностям. Временные ряды, соответствующие доходностям, представлены на графике 3.2, а некоторые статистики относительно распределений доходностей в таблице 3.1

Таблица 3.1. Доходности активов

	BTC	ETH	DOT	OKB	XRP	SOL	TRX	LTC
mean	0.0073	0.0038	-0.0031	0.0077	0.0132	0.0114	0.0105	0.0025
std	0.0779	0.0961	0.1110	0.0936	0.1328	0.1482	0.0800	0.1001
min	-0.3328	-0.3830	-0.3925	-0.3591	-0.3596	-0.6018	-0.3162	-0.3392
25%	-0.0358	-0.0477	-0.0724	-0.0401	-0.0506	-0.0765	-0.0236	-0.0513
50%	0.0026	-0.0013	-0.0084	-0.0016	-0.0003	-0.0034	0.0106	0.0001
75%	0.0446	0.0555	0.0573	0.0494	0.0430	0.0906	0.0373	0.0546
max	0.3566	0.5056	0.6188	0.4003	1.0235	0.7409	0.7407	0.5294



Рис. 3.1. Цены активов

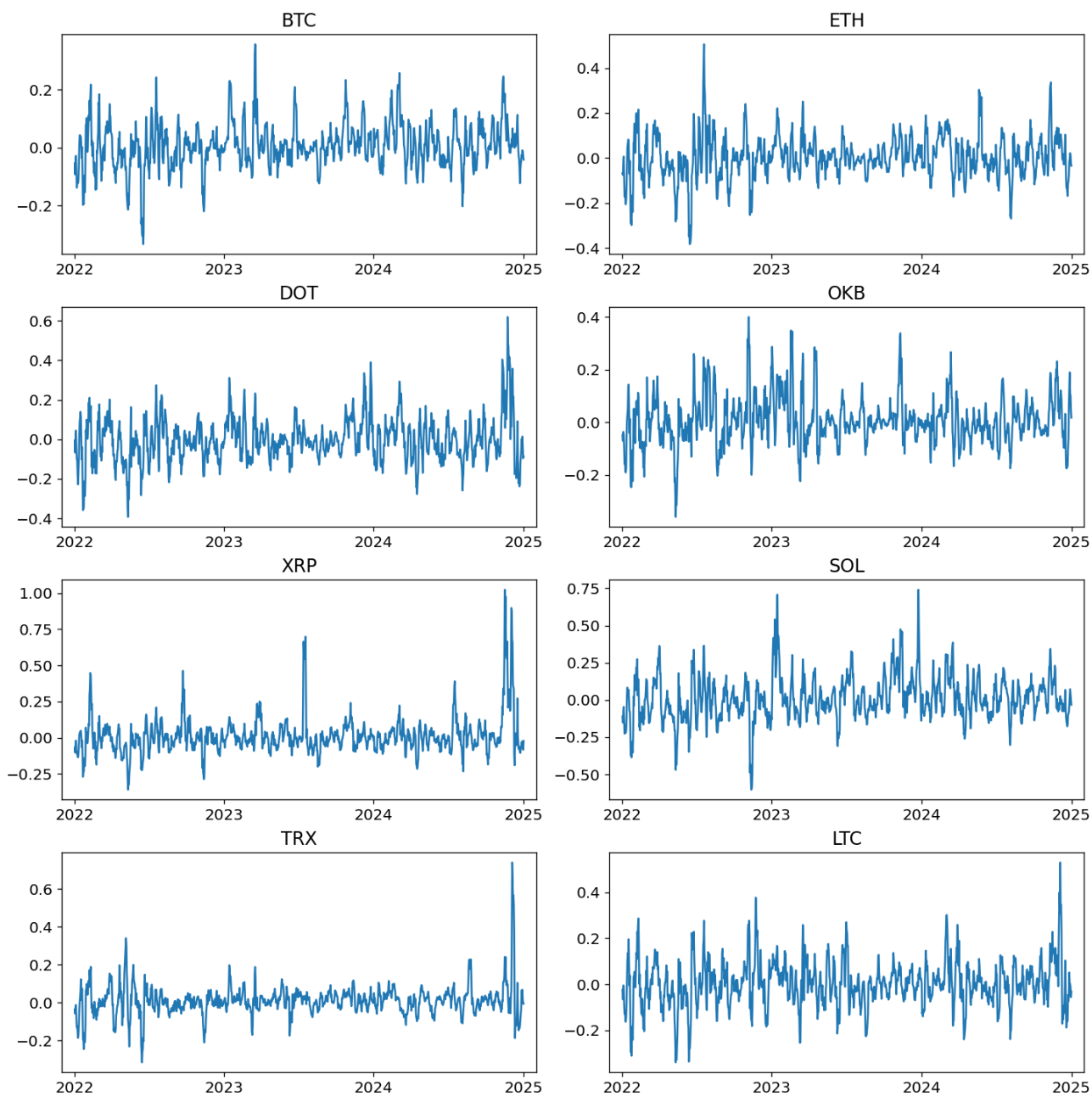


Рис. 3.2. Доходности активов

Можно видеть редкие но достаточно сильные скачки.

Распределение доходностей активов представлено на гистограммах на рисунке 3.3

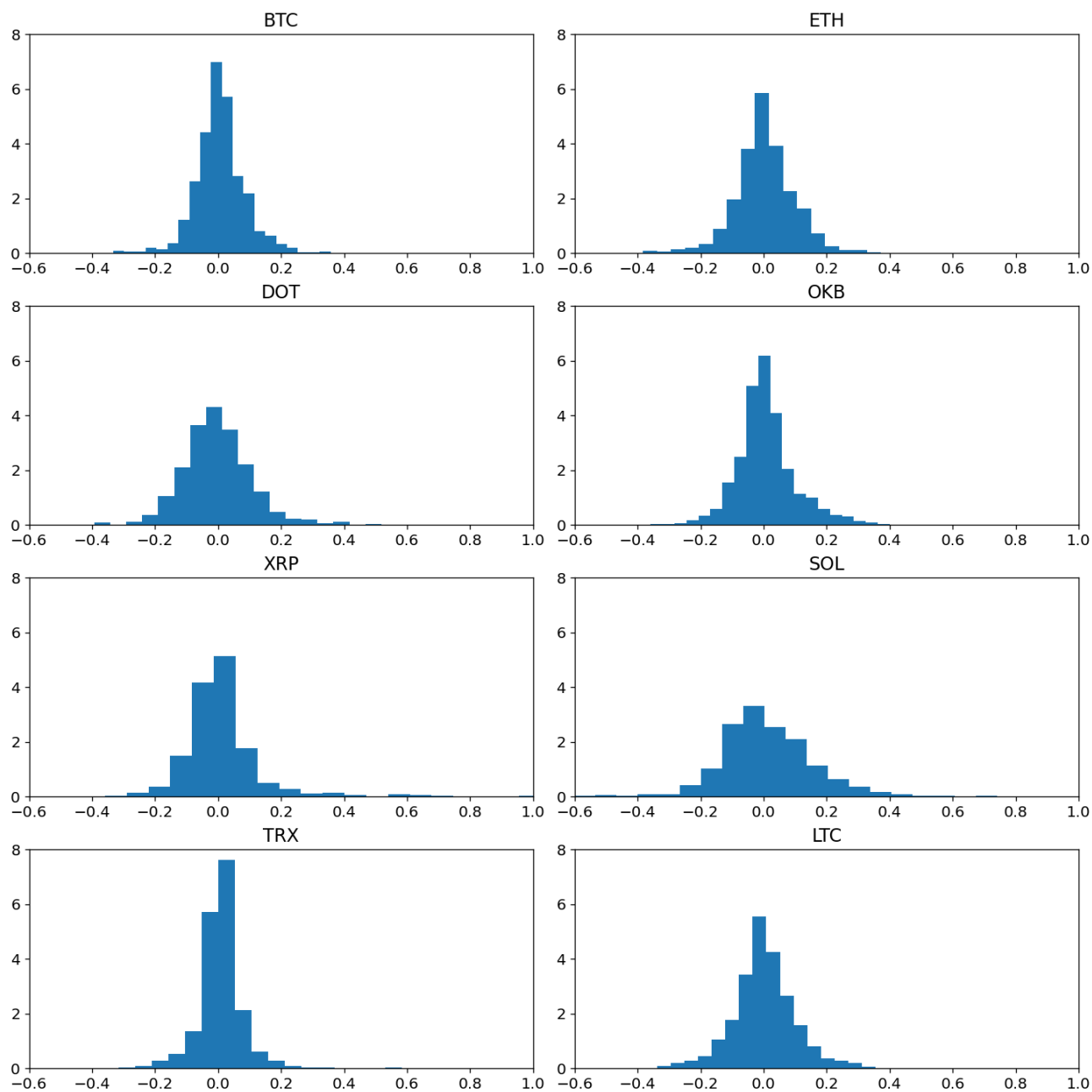


Рис. 3.3. Гистограммы доходностей активов

Из гистограмм видно, что распределение доходностей унимодально и имеет тяжелые хвосты.

На графике 3.4 сравниваются активы с точки зрения среднего и стандартного отклонения доходности.

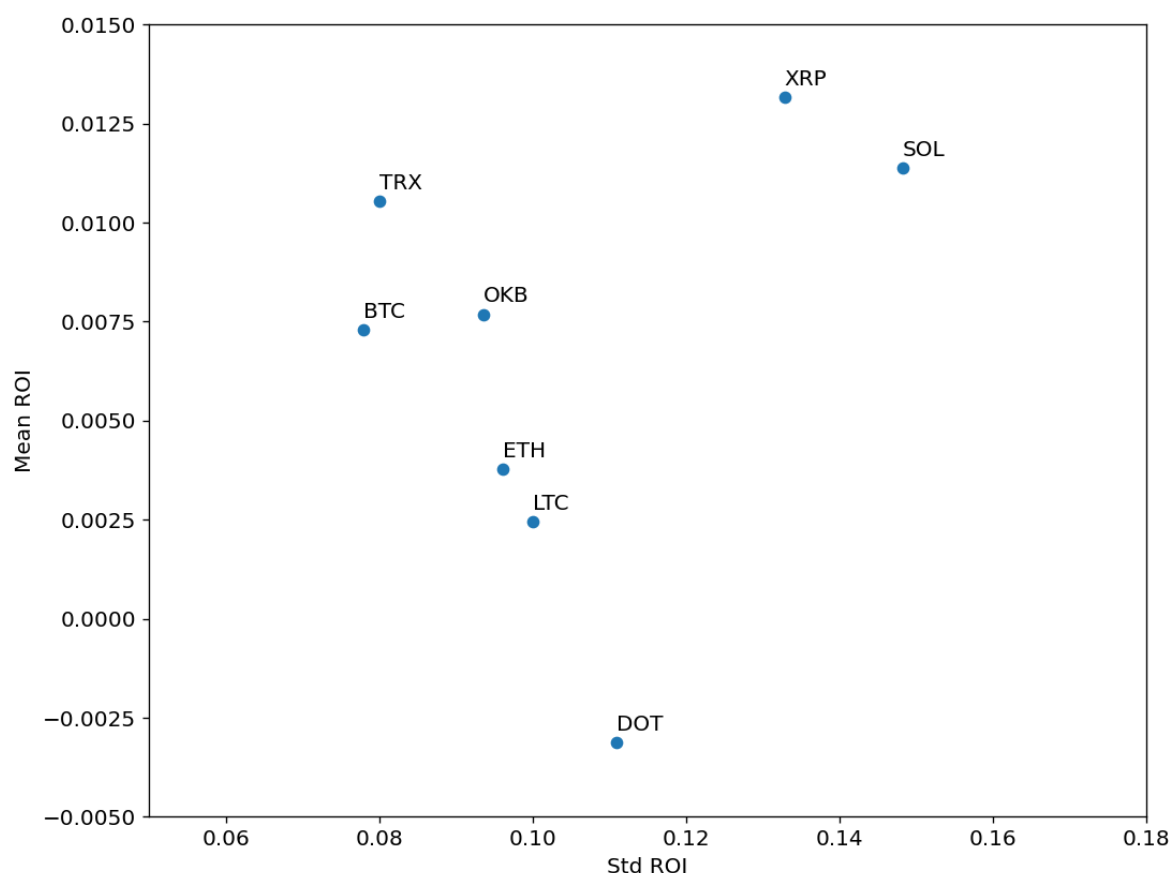


Рис. 3.4. Среднее и стандартное отклонение доходностей

Разделим имеющиеся данные на валидационную и тестовую выборки. В качестве тестовых данных возьмем 2024 год. По валидационной выборке подберем оптимальное число лагов ряда и индивидуальные гиперпараметры алгоритмов.

В дальнейшем тестовые данные будут использоваться для:

1. оценки качества прогнозирования средней ожидаемой доходности
2. тестирования портфельных стратегий

Из тестовых данных формируется набор тест-кейсов на которых и оценивается качество. Процесс формирования тест-кейсов схематично проиллюстрирован на рисунке 3.5.

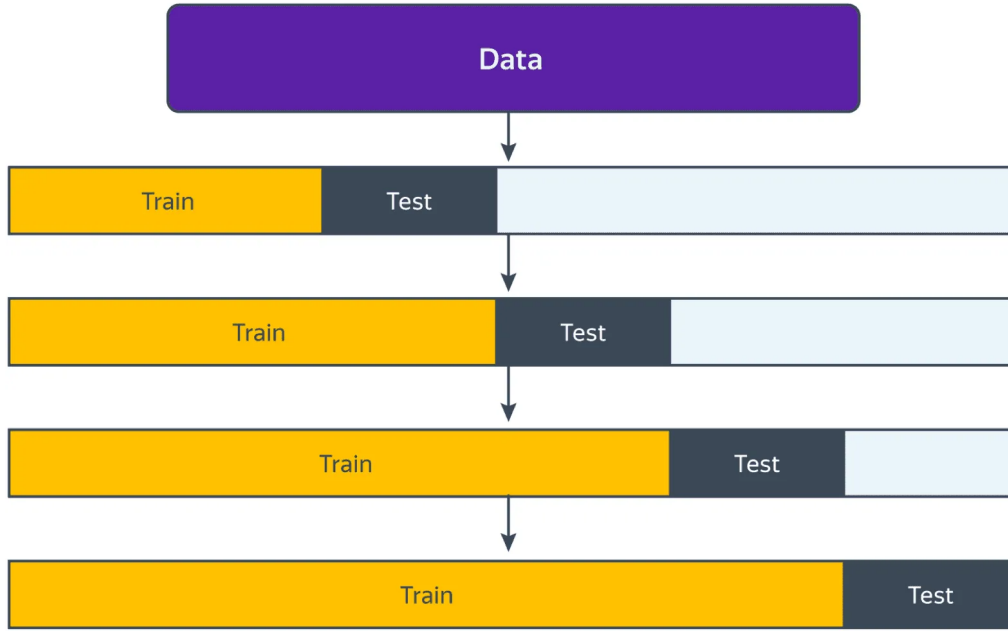


Рис. 3.5. Формирование тест-кейсов из тестовых данных

Следующим этапом идет расчет необходимых параметров для оптимизации портфеля — оценка ковариаций и прогноз средних значений доходности.

3.2. Оценка ковариации между активами

Особую сложность представляет задача прогноза будущей ковариации временных рядов. Вполне естественным является предположение стационарности ковариации во времени. Поэтому воспользуемся выборочной оценкой ковариации по историческим данным.

Имея r_t - вектор-столбец доходностей в момент времени t , по истории наблюдений r_1, \dots, r_n выборочная ковариация $\hat{\Sigma}$ рассчитывается как

$$\hat{\Sigma} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (r_t - \bar{r}) \cdot (r_t - \bar{r})^T \quad (3.1)$$

где $\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n r_t$.

Корреляция Пирсона между доступными активами представлена на рисунке 3.6.

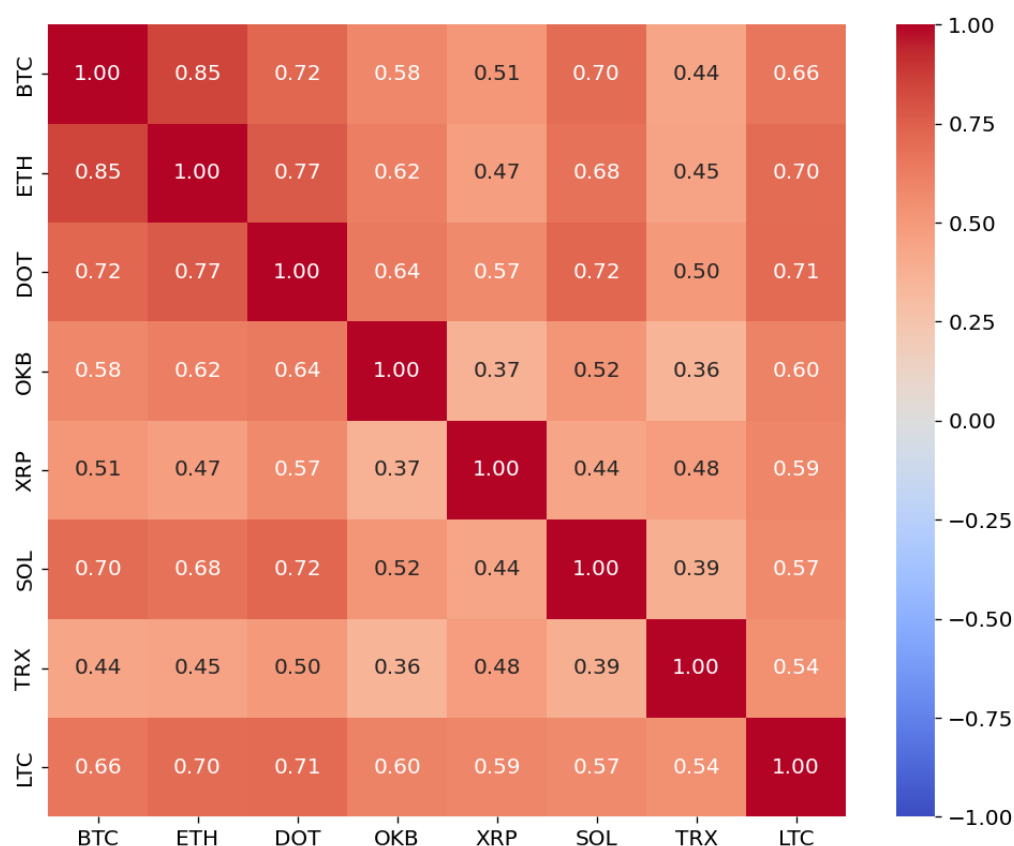


Рис. 3.6. Корреляции доходностей активов

Активы имеют сильную положительную корреляцию. Согласно теории, описанной в главе 1, желательным является возможность инвестирования в активы с отрицательной корреляцией. Однако, это не мешает редуцировать риски портфеля.

Для формирования портфеля остается оценить средние ожидаемые доходности. Перейдем к рассмотрению моделей для прогнозирования этих значений.

3.3. Модели оценки средней доходности

Задача оценки средней ожидаемой доходности сводится к умению прогнозировать значение основываясь на истории наблюдений. Для этого подходят классические статистические модели, модель машинного обучения и нейросети, адаптированные для прогнозирования временных рядов. Реализации

моделей взяты из программных библиотек для Python [1] и [2].

Ограничимся рассмотрением следующих моделей:

1. NAIVE - прогнозирование историческим средним
2. MARTINGAL - прогноз последним наблюдаемым значением
3. ARIMA - модель авторегрессии и скользящего среднего (см. 2.4)
4. LR - линейная регрессия (см. 2.2)
5. RF - случайный лес (см. 2.3)

Для каждого актива будем строить отдельную модель не принимающую в расчет историю других активов. Таким образом, для прогноза будущих доходностей активов необходимо построить моделей по числу активов.

Некоторые модели (ARIMA, RF) — допускают свободу в выборе гиперпараметров. Подбор гиперпараметров моделей осуществлялся по тренировочной выборке.

Качество прогнозирования моделей оценивается с помощью среднеквадратичной ошибки MSE (Mean Squared Error):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - \hat{r}_i)^2 \quad (3.2)$$

где r_i - истинное значение доходности, а \hat{r}_i - прогнозное значение модели на i -м объекте тестовой выборки.

Результаты оценки качества прогнозирования на тестовых данных представлены в таблице 3.2

Таблица 3.2. Качество прогнозирования $MSE \cdot 10^4$

	NAIVE	MARTINGAL	LR	ARIMA	RF
BTC	5.63	1.20	1.58	1.62	2.07
ETH	8.00	1.99	4.47	3.70	5.05
DOT	16.51	3.89	4.09	3.98	5.28
OKB	6.06	1.56	1.77	1.95	2.05
XRP	24.33	5.04	6.98	5.71	6.53
SOL	21.19	4.47	11.86	6.16	5.31
TRX	7.96	1.85	4.19	5.30	6.04
LTC	8.53	2.66	2.24	3.22	5.11

Наихудшее значение показывает подход NAIVE. Это обусловлено резким ростом цен в 2024 году после относительно спокойной динамики. Метод

MARTINGAL показывает хорошие результаты в случае рядов с затяжным трендов. Остальные модели показывают сопоставимое качество.

3.4. Оценка доходностей стратегий

Будем рассматривать стратегии двух видов:

- тривиальные
- основанные на идеи Марковица

Среди тривиальных стратегий выберем следующие:

1. UNIFORM - равномерное инвестирование во все доступные активы
2. MOST RISKY - актив с наибольшей дисперсией доходности
3. LESS RISKY - актив с наименьшей дисперсией доходности
4. BEST RETURN - актив с наибольшей средней доходностью
5. WORST RETURN - актив с наименьшей средней доходностью

Стратегии Марковица определяются риск-параметром и моделью оценки средней ожидаемой доходностью. Риск-параметр будем воспринимать как параметризацию класса стратегий с определенной моделью оценки средней ожидаемой доходности. Таким образом, одной стратегии Марковица соответствует множество стратегий с разным риск-параметром. Это множество стратегий будет называть фронтирой.

На каждом тест-кейсе с помощью стратегии формируется инвестиционный портфель в расчете на единичную сумму инвестирования и оценивается доходность ROI (Return On Investment) полученной стратегии. Метрика ROI определяется для стратегии аналогично доходности портфеля 1.1.

На графике 3.7 представлены фронтиры соответствующие торговым стратегиям. Серым цветом отмечены тривиальные портфели. По оси абсцисс отложены стандартные отклонения ROI, а по оси ординат — средние значения ROI.

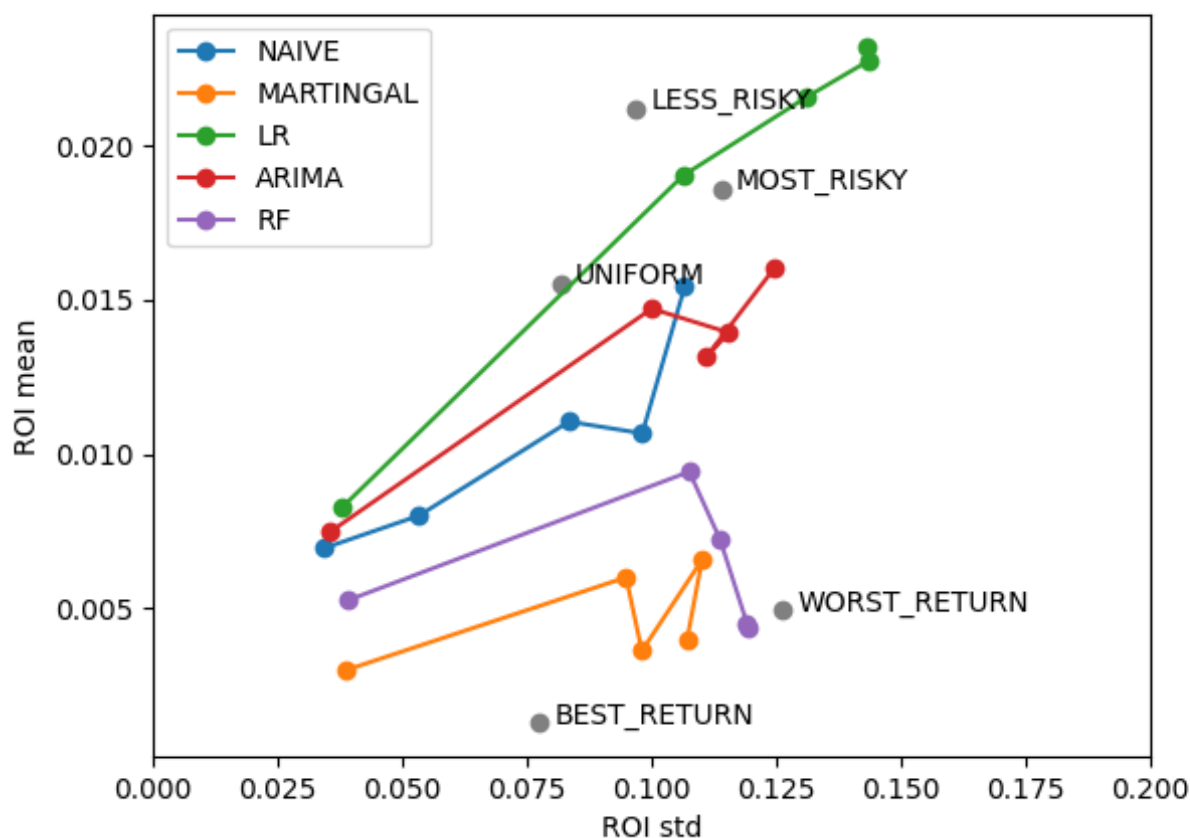


Рис. 3.7. Результаты тестирования стратегий

Более детально средние значения и стандартные отклонения ROI стратегий представлены в таблицах 3.3 и 3.4 соответственно.

Метрики тривиальных портфелей представлены в таблице 3.5

Таблица 3.3. Средние ROI $\cdot 10^3$

	0.01	0.25	0.50	0.75	1.00
NAIVE	6.9451	8.0025	11.0462	10.6657	15.4227
MARTINGAL	2.9859	6.0019	3.6178	6.5656	3.9942
LR	8.2600	19.0185	21.5537	22.7442	23.1668
ARIMA	7.4648	14.7066	13.9296	13.1520	15.9971
RF	5.2633	9.4236	7.2398	4.3777	4.5050

Таблица 3.4. Стандартное отклонение ROI $\cdot 10^2$

	0.01	0.25	0.50	0.75	1.00
NAIVE	3.4328	5.3375	8.3427	9.8131	10.6650
MARTINGAL	3.8577	9.4886	9.8051	11.0111	10.7128
LR	3.7892	10.6314	13.1000	14.3570	14.3071
ARIMA	3.5454	10.0037	11.5506	11.1001	12.4518
RF	3.9215	10.7564	11.3710	11.9397	11.9118

Таблица 3.5. Тривиальные портфели

	mean ROI $\cdot 10^3$	std ROI $\cdot 10^2$
UNIFORM	15.5372	8.1775
MOST RISKY	18.5904	11.3970
LESS RISKY	21.1635	9.6881
BEST RETURN	1.2790	7.7329
WORST RETURN	4.9217	12.6324

На тестовых данных метод оценки средней доходности с помощью модели линейной регрессии строго доминирует над всеми остальными методами при любом значении риск-параметра.

Модели ARIMA и NAIVE позволяют контролировать риски портфеля за счет изменения риск-параметра. При формировании портфеля минимального риска эти модели сопоставимы между собой.

Модели RF и MARTINGAL показали неудовлетворительное качество. При увеличении толерантности к риску, доходность портфеля не возрастает, что противоречит теории и здравому смыслу.

Инвестирование равных долей во все доступные активы является приемлемым, однако такой подход не позволяет контролировать риски.

Формирование портфеля состоящего только из одного актива сильно непредсказуемо и, следовательно, рискованно из-за сильных колебаний цен (специфика криптовалютных рынков).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была рассмотрена проблема формирования оптимального портфеля с точки зрения ожидаемой доходности и принимаемого риска. Был предложен метод оценки средних ожидаемых доходностей, необходимых для построения портфеля оптимального по Марковицу. В рамках этого метода рассматривались некоторые модели прогнозирования временных рядов. В практической части были проверены на реальных данных доходности торговых стратегий, построенных согласно теории Марковица, где для прогнозирования неизвестных характеристик использовались рассмотренные модели.

По имеющимся эмпирическим результатам можно сделать следующие выводы:

- активы имеют сильную положительную корреляцию
- стремление сформировать портфель с большей доходностью влечет большие риски
- диверсификация действительно позволяет снижать риск портфеля
- как правило, формирование портфеля доминирует над инвестированием в отдельные активы
- линейная модель авторегрессии показала лучшее качество для оценки средней доходности

Полученные теоретические выкладки и программную реализацию формирования портфелей можно применять при выборе своей инвестиционной стратегии.

Дальнейшие шаги по исследованию данной темы могут быть следующими:

- рассмотреть другие классы методов прогнозирования временных рядов
- помимо авторегрессионных признаков, учесть влияние внешних факторов на формирование цен
- расширить рассматриваемый набор активов
- исследовать другие таймфреймы и периоды инвестирования

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Библиотека Python для прогнозирования временных рядов с использованием моделей машинного обучения [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://skforecast.org/0.15.1/>. — Дата доступа 25.05.2025
2. Библиотека машинного обучения с открытым исходным кодом. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://scikit-learn.org/stable/>. — Дата доступа 25.05.2025
3. Криптовалютная биржа с расширенными финансовыми предложениями [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.okx.com/>. — Дата доступа: 25.05.2025
4. Шарп, У.Ф. Инвестиции : учебник : пер. с англ. / У.Ф. Шарп, Г.Д. Александер, Д.В. Бэйли. — Москва : ИНФРА-М, 2022. — 1028 с.
5. Ширяев, А. Н. Основы стохастической финансовой математики: Т.1: Факты, модели / А. Н. Ширяев – МЦНМО, 2016. — 440 с.
6. Ширяев, А. Н. Основы стохастической финансовой математики: Т.2: Теория / А. Н. Ширяев – МЦНМО, 2016. — 464 с.
7. Breiman, L. Random Forests. Machine Learning / Leo Breiman — Statistics Department University of California Berkeley, CA, 2001, 33 p.
8. Markowitz, H. Portfolio selection / H. Markowitz — The Journal of Finance, March 1952, 77-91 p.
9. Linter J. The valuation of risky assets and the selection of risky investments on stock portfolios and capital budgets / John Linter — Review of Economics and Statistics, February 1965, 13-34 p.
10. Nakamoto S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System / Satoshi Nakamoto — Japan, 2008, 9 p.
11. Roll R., Ross S. A. An emperical investigation of the arbitrage pricing theory / Richard Roll, Stephen Ross — Journal of Finance, 1980, 1073-1103 p.
12. Ross S. A. The arbitrage theory of capital asset pricing / Stephen A. Ross — Journal of Finance, 1989, 1-18 p.
13. Sharpe W. F. Capital asset prices: A theory of market equilibrium under conditions of risk / William F. Sharp — Journal of Finance, September 1964, 425-442 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

```
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import seaborn as sns
5 import json
6 import tqdm
7 from scipy import optimize as opt
8 from sklearn import metrics as skmetrics
9 from sklearn.linear_model import LinearRegression, Ridge
10 from sklearn.model_selection import train_test_split
11 from sklearn.ensemble import AdaBoostRegressor, RandomForestRegressor
12 from skforecast.direct import ForecasterDirect, ForecasterDirectMultiVariate
13 from skforecast.recursive import ForecasterRecursive, ForecasterSarimax
14 from skforecast.sarimax import Sarimax
15 from skforecast.model_selection import TimeSeriesFold
16 from skforecast.model_selection import backtesting_forecaster, \
17     backtesting_sarimax, grid_search_forecaster, grid_search_sarimax
18
19 df_prices = pd.read_csv(
20     './code/data/crypto.csv',
21     index_col='dt',
22     parse_dates=['dt'])
23 df_prices.drop('TON-USDT', axis=1, inplace=True)
24 df_prices.columns = [c.split('-')[0] for c in df_prices.columns]
25 print(df_prices.head())
26
27 days_shift = 7
28 df_returns = df_prices.diff(days_shift) / df_prices.shift(days_shift)
29 df_returns = df_returns[df_returns.isna().sum(axis=1) == 0]
30 df_returns = df_returns[df_returns.index >= '2022-01-01']
31
32 n_observations, n_assets = df_returns.shape
33 print(n_observations, n_assets)
34 print(df_returns.head())
35
36 threshold_date = '2023-10-01'
37 df_returns_test = df_returns[df_returns.index >= threshold_date]
38 df_returns_train = df_returns[df_returns.index < threshold_date]
39 print(df_returns_train.shape, df_returns_test.shape)
40
41 def mse_last_value(y_true, y_pred):
42     idxs = range(0, len(y_true), days_shift)
43     return skmetrics.mean_squared_error(
44         y_true.iloc[idxs], y_pred.iloc[idxs])
45
46 # HP optimization
47 cv = TimeSeriesFold(
48     steps=days_shift,
49     initial_train_size=50,
50     refit=False,
51 )
52
53 lags_grid = {
54     '0': 1,
55     '1': range(1, 4),
56     '2': range(1, 8),
57     '3': range(1, 15),
58 }
59
60 arima_params = {
61     'order': [
62         (1, 0, 0),
63         (0, 0, 1),
64         (1, 0, 1),
65         (1, 1, 1),
66         (2, 0, 2),
67     ],
68 }
```

```

69         (2, 1, 2),
70     ]
71 }
72
73 model_grid = [
74     (LinearRegression, 'LR', {}),
75     (RandomForestRegressor, 'RF', {
76         'n_estimators': [10, 50, 100],
77         'random_state': [27]
78     }),
79 ]
80
81 best_models = {}
82 for c in df_returns.columns:
83     # ARMA
84     train_data = df_returns_train[c].reset_index(drop=True)
85     forecaster = ForecasterSarimax(
86         regressor=Sarimax(),
87         forecaster_id=f'ARIMA_{c}'
88     )
89     metric = grid_search_sarimax(
90         forecaster=forecaster,
91         y=train_data,
92         param_grid=arima_params,
93         cv=cv,
94         metric=mse_last_value,
95         return_best=True,
96         n_jobs='auto',
97         verbose=False,
98         show_progress=True
99     )
100     if best_models.get('ARIMA') is None:
101         best_models['ARIMA'] = []
102     best_models['ARIMA'].append(forecaster)
103
104     # ML
105     for model_builder, model_name, params in model_grid:
106         train_data = df_returns_train[c].reset_index(drop=True)
107         forecaster = ForecasterRecursive(
108             regressor=model_builder(),
109             lags=range(1, 8),
110             forecaster_id=f'{model_name}_{c}'
111         )
112         metric = grid_search_forecaster(
113             forecaster=forecaster,
114             y=train_data,
115             param_grid=params,
116             lags_grid=lags_grid,
117             cv=cv,
118             metric=mse_last_value,
119             return_best=True,
120             n_jobs='auto',
121             verbose=False,
122             show_progress=True
123         )
124         if best_models.get(model_name) is None:
125             best_models[model_name] = []
126         best_models[model_name].append(forecaster)
127
128 print(best_models.keys())
129
130 # evaluate models on test data
131 cv = TimeSeriesFold(
132     steps=days_shift,
133     initial_train_size=50,
134     refit=True,
135 )
136
137 backtest_metrics = {}
138
139 for model_type, models in best_models.items():
140     if model_type == 'ARIMA':
141         for c, forecaster in zip(df_returns_test.columns, models):

```

```

142         data_test = df_returns_test[c].reset_index(drop=True)
143         metric, predictions = backtesting_sarimax(
144             forecaster=forecaster,
145             y=data_test,
146             cv=cv,
147             metric=mse_last_value,
148             n_jobs=-1,
149         )
150         if backtest_metrics.get(model_type) is None:
151             backtest_metrics[model_type] = []
152         backtest_metrics[model_type].append(metric.values.item())
153     else:
154         for c, forecaster in zip(df_returns_test.columns, models):
155             data_test = df_returns_test[c].reset_index(drop=True)
156             metric, pred = backtesting_forecaster(
157                 forecaster=forecaster,
158                 y=data_test,
159                 cv=cv,
160                 metric=mse_last_value,
161                 n_jobs=-1,
162             )
163             if backtest_metrics.get(model_type) is None:
164                 backtest_metrics[model_type] = []
165             backtest_metrics[model_type].append(metric.values.item())
166
167     # martingal mse
168     backtest_metrics['MARTINGAL'] = (
169         (df_returns_test - df_returns_test.shift())**2
170         ).mean(axis=0).to_list()
171     backtest_metrics['NAIVE'] = (
172         (df_returns_train.mean(axis=0) - df_returns_test)**2
173         ).mean(axis=0).to_list()
174
175     # mse on test data
176     (pd.DataFrame(
177         {m: backtest_metrics[m] for m in [
178             'NAIVE', 'MARTINGAL', 'LR', 'ARIMA', 'RF'
179         ]},
180         index=df_returns.columns) * 1000
181     ).to_latex('..../tables/ml_eval_metrics.tex',
182         caption='Качество прогнозирования',
183         float_format='%.2f',
184         position='h',
185         label='tab:ml_eval_metrics'
186     )
187
188     def portfolio_optimizer(mu_hat, cov_hat, tau):
189         def objective(w):
190             w = w.reshape((-1, 1))
191             return (w.T @ cov_hat @ w - tau * w.T @ mu_hat).item()
192
193         def unit_portfolio(w):
194             return np.abs(w).sum() - 1
195
196         eq_cons = {
197             'type': 'eq',
198             'fun': unit_portfolio,
199         }
200         bounds = [(-1, 1) for i in range(n_assets)]
201         x0 = np.ones(n_assets) / n_assets
202         sol = opt.minimize(
203             fun=objective,
204             x0=x0,
205             method='SLSQP',
206             bounds=bounds,
207             constraints=[eq_cons]
208         )
209         if sol.success:
210             return sol.x
211
212     # %%
213

```



```

214 def frontier_evaluator(mu_hat, cov_hat, ret_true, frontier_tau):
215     frontier = np.full_like(frontier_tau, np.nan)
216     for i in range(len(frontier_tau)):
217         tau = frontier_tau[i]
218         w = portfolio_optimizer(mu_hat, cov_hat, tau)
219         if w is None:
220             print('not converged')
221             continue
222         roi = np.dot(w, ret_true)
223         frontier[i] = roi
224     return frontier
225
226 # mu estimators
227 def naive_estimator(df_hist):
228     return df_hist.mean(axis=0)
229
230 def martingal_estimator(df_hist):
231     return df_hist.iloc[-1]
232
233 def ml_estimator_builder(models):
234     def func(df_hist):
235         mu_hat = []
236         for c, forecaster in zip(df_hist.columns, models):
237             y = df_hist[c].reset_index(drop=True)
238             forecaster.fit(y)
239             mu_hat.append(forecaster.predict(days_shift).iloc[-1])
240         return np.array(mu_hat)
241     return func
242
243 n_assets = df_returns.shape[1]
244
245 idx_most_risky = np.argmax(df_returns_train.describe().T['std'])
246 idx_less_risky = np.argmin(df_returns_train.describe().T['std'])
247 idx_best_return = np.argmax(df_returns_train.describe().T['mean'])
248 idx_worst_return = np.argmin(df_returns_train.describe().T['mean'])
249 print(idx_most_risky,
250       idx_less_risky,
251       idx_best_return,
252       idx_worst_return)
253
254 def single_asset_portfolio_builder(idx):
255     w = np.zeros(n_assets)
256     w[idx] = 1
257     return w
258
259 def uniform_portfolio_builder():
260     return np.full(n_assets, 1 / n_assets)
261
262 print(best_models.keys())
263
264 results_frontier = []
265 results_trivial = []
266
267 min_history_leng = 91
268 total_runs = df_returns_test.shape[0] - days_shift - min_history_leng
269 print(total_runs)
270 frontier_tau = np.linspace(0.01, 1, 5)
271
272 mu_estimators = [
273     ('NAIVE', naive_estimator),
274     ('MARTINGAL', martingal_estimator),
275     ('LR', ml_estimator_builder(best_models['LR'])),
276     ('ARIMA', ml_estimator_builder(best_models['ARIMA'])),
277     ('RF', ml_estimator_builder(best_models['RF'])),
278 ]
279
280 trivial_portfolios = [
281     ('UNIFORM', uniform_portfolio_builder()),
282     ('MOST_RISKY', single_asset_portfolio_builder(idx_most_risky)),
283     ('LESS_RISKY', single_asset_portfolio_builder(idx_less_risky)),
284     ('BEST_RETURN', single_asset_portfolio_builder(idx_best_return)),
285     ('WORST_RETURN', single_asset_portfolio_builder(idx_worst_return)),
286 ]

```

```

287
288 for t in tqdm.trange(total_runs):
289     # prepare data
290     idx_history = min_history_leng + t
291     idx_future = idx_history + days_shift - 1
292     df_history = df_returns_test.iloc[:idx_history]
293     df_future = df_returns_test.iloc[idx_future]
294
295     # estimate cov, common for all models
296     cov_hat = df_history.cov().values
297
298     # estimate mu using list of models
299     frontiers = []
300     for name, mu_estimator in mu_estimators:
301         mu_hat = mu_estimator(df_history)
302
303         # evaluate each portfolio in frontier for currnet model
304         roi_frontier = frontier_evaluator(
305             mu_hat, cov_hat, df_future.values, frontier_tau)
306         frontiers.append(roi_frontier)
307     results_frontier.append(frontiers)
308
309     # evaluate trivial strategies
310     trivials = []
311     for name, w in trivial_portfolios:
312         roi = np.dot(w, df_future.values).item()
313         trivials.append(roi)
314     results_trivial.append(trivials)
315
316     frontier_means = np.nanmean(results_frontier, axis=0)
317     frontier_stds = np.nanstd(results_frontier, axis=0)
318
319     trivial_means = np.mean(results_trivial, axis=0)
320     trivial_stds = np.std(results_trivial, axis=0)
321
322     print(frontier_means, frontier_stds)
323
324     fig, ax = plt.subplots()
325     for m, s, (label, _) in zip(
326         frontier_means, frontier_stds, mu_estimators):
327         ax.plot(s, m, marker='o', label=label)
328
329     ax.scatter(trivial_stds, trivial_means, color='grey')
330     for s, m, (name, _) in zip(
331         trivial_stds, trivial_means, trivial_portfolios):
332         ax.text(s + 0.003, m, name)
333
334     ax.set_xlabel('ROI std')
335     ax.set_ylabel('ROI mean')
336     ax.set_xlim(0, 0.2)
337     ax.legend()
338     fig.savefig('../images/result_frontiers.png')
339
340     print(np.isnan(results_frontier).mean(axis=0))
341
342     # mean ROI
343     (pd.DataFrame(
344         frontier_means, columns=[f'{t: .2f}' for t in frontier_tau],
345         index=[n for n, _ in mu_estimators]) * 1000
346     ).to_latex('../tables/roi_mean.tex',
347         caption='Средние ROI  $\cdot 10^3$ ',
348         float_format='%.4f',
349         position='h',
350         label='tab:roi_mean',
351     )
352
353     # std ROI
354     (pd.DataFrame(
355         frontier_stds, columns=[f'{t: .2f}' for t in frontier_tau],
356         index=[n for n, _ in mu_estimators]) * 100
357     ).to_latex('../tables/roi_std.tex',
358         caption='Стандартное отклонение ROI  $\cdot 10^2$ ',
359         float_format='%.4f',
360         position='h',

```

```

361         label='tab:roi_std'
362     )
363
364     (pd.DataFrame({
365         'mean ROI  $\cdot 10^3$ ': trivial_means * 1000,
366         'std ROI  $\cdot 10^2$ ': trivial_stds * 100,
367     },
368     index=[n.replace('_', ' ') for n, _ in trivial_portfolios])
369 ).to_latex('../tables/trivial_rois.tex',
370     caption='Тривиальные портфели',
371     float_format='%.4f',
372     position='h',
373     label='tab:trivial_rois',
374 )

```