

УДК 339.133:517.443

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО СПРОСА В РОЗНИЧНОЙ ТОРГОВЛЕ

Ничепуренко И.А., Мекенбаев Б.Т.

КГТУ им.И.Раззакова

В статье рассматриваются возможности применения преобразования Фурье для анализа сезонных колебаний потребительского спроса в розничной торговле. Сезонность является одним из ключевых факторов, определяющих динамику продаж товаров различных категорий. Традиционные методы анализа временных рядов позволяют выявлять тренды и сезонные компоненты, однако их эффективность снижается при наличии сложных периодических зависимостей. Преобразование Фурье предоставляет возможность разложить временной ряд продаж на совокупность гармонических составляющих и определить доминирующие частоты, характеризующие циклическое поведение покупателей. Представлены теоретические основы метода, алгоритм анализа и пример применения к данным розничной торговли. Результаты показывают, что спектральный анализ позволяет выявлять недельные, месячные и годовые циклы спроса, что способствует повышению точности прогнозирования и эффективности управления товарными запасами.

Ключевые слова: преобразование Фурье, временные ряды, сезонность спроса, розничная торговля, прогнозирование продаж, спектральный анализ, ритейл.

ЧЕКЕНЕ СООДАДАГЫ КЕРЕКТӨӨЧҮЛӨРДҮН СУРОО- ТАЛАПТАРЫНЫН СЕЗОНДУК ӨЗГӨРҮҮЛӨРҮН АНЫКТООДО ФУРЬЕ ӨЗГӨРТҮҮСҮН КОЛДОНУУ

Ничепуренко И.А., Мекенбаев Б.Т.

И.Раззаков атындагы КМТУ

Бул макалада чекене соодадагы керектөөчүлөрдүн суроо-талаптарынын сезондук өзгөрүүлөрүн талдоодо Фурье өзгөртүүсүн колдонуу мүмкүнчүлүктөрү каралат. Сезондуулук ар кандай товардык категориялар боюнча сатуу көлөмүнүн өзгөрүшүнө таасир этүүчү негизги факторлордун бири болуп саналат. Убакыт катарларын талдоонун салттуу ыкмалары тренддерди жана сезондук компоненттерди аныктоого мүмкүндүк бергени менен, татаал мезгилдүүлүк кездешкен учурларда алардын натыйжалуулугу төмөндөшү мүмкүн. Фурье өзгөртүүсү сатуу маалыматтарын гармониялык курамдарга ажыратып, керектөөчүлөрдүн сатып алуу жүрүм-турумун мүнөздөгөн негизги жыштыктарды аныктоого шарт түзөт. Макалада ыкманын теориялык негиздери, талдоо алгоритми жана чекене соодадагы маалыматтарга колдонуу мисалы келтирилген. Изилдөөнүн жыйынтыктары спектралдык талдоо суроо-талаптын жумалык, айлык жана жылдык циклдерин натыйжалуу аныктоого мүмкүндүк берерин жана бул сатуу көлөмүн болжолдоонун тактыгын жогорулатууга, ошондой эле товардык запастарды башкарууну жакшыртууга жардам берерин көрсөттү. Фурье өзгөртүүсүнө негизделген ыкмалар заманбап чекене сооданы башкарууда суроо-талапты болжолдоонун жана чечим кабыл алууну колдоонун натыйжалуу куралы болуп саналат.

Баштапкы сөздөр: Фурье өзгөртүүсү, убакыт катарлары, суроо-талаптын сезондуулугу, чекене соода, сатууларды болжолдоо, спектралдык талдоо, керектөөчүлүк суроо-талап.

APPLICATION OF FOURIER TRANSFORM FOR IDENTIFYING SEASONAL FLUCTUATIONS IN CONSUMER DEMAND IN RETAIL TRADE

Nichepurenko I.A., Mekenbaev B.T.

Razzakov Kyrgyz State Technical University

This article examines the application of the Fourier transform for analyzing seasonal fluctuations in consumer demand in retail trade. Seasonality is one of the key factors affecting sales dynamics across various product categories. Traditional time series analysis methods allow researchers to identify trends and seasonal components; however, their effectiveness may decrease when demand patterns contain complex periodic dependencies. The Fourier transform makes it possible to decompose a sales time series into a set of harmonic components and determine dominant frequencies that characterize

consumer purchasing behavior. The paper presents the theoretical foundations of the method, an analysis algorithm, and an example of its application to retail sales data. The results demonstrate that spectral analysis can effectively identify weekly, monthly, and annual demand cycles, thereby improving forecasting accuracy and inventory management efficiency. The study confirms the potential of Fourier-based methods as a tool for demand forecasting and decision support in modern retail management.

Keywords: Fourier transform, time series analysis, demand seasonality, retail trade, sales forecasting, spectral analysis, consumer demand.

Актуальность исследования. Современная розничная торговля функционирует в условиях высокой конкуренции и постоянно изменяющегося потребительского поведения. Одной из важнейших задач категорийного менеджмента и управления цепями поставок является прогнозирование потребительского спроса. Ошибки прогнозирования приводят либо к дефициту товаров и потере продаж, либо к накоплению избыточных запасов и росту затрат на хранение.

Для большинства товарных категорий характерны выраженные сезонные колебания спроса. Продажи мороженого увеличиваются в летний период, кондитерских изделий — перед праздниками, школьных товаров — в преддверии учебного года. Помимо годовой сезонности, в розничной торговле наблюдаются недельные циклы, связанные с различиями в покупательской активности в будние и выходные дни.

Одним из эффективных инструментов исследования периодических процессов является преобразование Фурье, широко применяемое в цифровой обработке сигналов, телекоммуникациях, сейсмологии и экономическом анализе[1.2]. Метод позволяет представить временной ряд в виде набора гармонических колебаний различной частоты и амплитуды, благодаря чему становится возможным выявление скрытых циклических закономерностей в данных продаж. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности анализа спроса в условиях роста объемов данных и цифровизации розничной торговли.

Теоретические основы преобразования Фурье. Преобразование Фурье основано на предположении, что любой периодический сигнал может быть представлен как сумма синусоидальных и косинусоидальных функций различной частоты.

В непрерывном виде преобразование определяется выражением:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$$

где:

- $f(t)$ — исходный сигнал;
- $F(\omega)$ — спектральное представление сигнала;
- ω — угловая частота.

Для анализа данных продаж применяется дискретное преобразование Фурье (DFT) [3]:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i\frac{2\pi kn}{N}}$$

где: x_n — значения временного ряда; N — количество наблюдений; k — номер гармоники.

Результатом преобразования является спектр частот, отражающий вклад каждой периодической составляющей в общую динамику продаж.

Использование быстрого преобразования Фурье (FFT) существенно сокращает вычислительные затраты [4] и позволяет обрабатывать большие массивы данных практически в реальном времени.

Методика исследования. Для анализа сезонных колебаний спроса предлагается следующая последовательность действий [5]:

1. Сбор исторических данных продаж.
2. Очистка данных от пропусков и аномальных значений.
3. Удаление долгосрочного тренда.
4. Применение быстрого преобразования Фурье.
5. Построение амплитудного спектра.
6. Выявление доминирующих частот.
7. Интерпретация обнаруженных циклов.

В качестве объекта анализа может выступать временной ряд ежедневных продаж определенной товарной категории за период не менее одного года.

Предположим, что имеется ряд продаж кондитерских изделий за 730 дней. После выполнения FFT получен спектр частот, содержащий несколько выраженных пиков.

Если пик соответствует частоте:

$$f = \frac{1}{7}$$

то это свидетельствует о наличии недельного цикла спроса.

Частота:

$$f = \frac{1}{365}$$

указывает на годовую сезонность.

Наличие нескольких значимых гармоник позволяет сделать вывод о существовании сложной многокомпонентной структуры спроса.

Анализ сезонных колебаний спроса. В розничной торговле сезонность формируется под воздействием множества факторов:

- праздничных периодов;
- климатических условий;
- социальных событий;
- маркетинговых акций;
- особенностей потребительского поведения.

Преобразование Фурье позволяет количественно оценить влияние каждого периода.

Например, анализ продаж кондитерских изделий может выявить следующие циклы:

Период	Экономическая интерпретация
7 дней	Недельная сезонность
30 дней	Месячные циклы потребления
90 дней	Квартальная активность
365 дней	Годовая сезонность

Наибольшая амплитуда обычно соответствует годовому циклу, поскольку праздничные периоды оказывают существенное влияние на продажи.

Исследования последних лет показывают, что использование гармонических компонент Фурье позволяет повысить точность прогнозирования сезонного спроса по сравнению с традиционными моделями временных рядов. В частности, современные модели прогнозирования розничного спроса используют ряды Фурье для выделения сезонных компонентов[6.7] и демонстрируют более высокую точность на данных ритейла.

Практическое применение в ритейле. Использование преобразования Фурье в деятельности торговых сетей обеспечивает ряд преимуществ.

Во-первых, повышается качество прогнозирования продаж. Выявленные частотные компоненты могут использоваться в моделях планирования закупок и пополнения запасов.

Во-вторых, появляется возможность оптимизации складских остатков. Знание периодов роста спроса позволяет заранее формировать необходимые товарные запасы.

В-третьих, улучшается планирование маркетинговых мероприятий. Определение сезонных максимумов помогает выбирать наиболее эффективные периоды проведения акций.

Кроме того, спектральный анализ может использоваться для сегментации товарных категорий по характеру сезонности. Товары с ярко выраженными сезонными колебаниями требуют иных подходов к управлению ассортиментом по сравнению с товарами стабильного спроса.

Современные исследования в области прогнозирования спроса подтверждают эффективность применения методов, основанных на преобразовании Фурье [8, 9], для выявления сезонных компонентов и повышения точности прогнозов в розничной торговле.

В рамках исследования был проведён спектральный анализ ежедневных продаж условной товарной категории «Кондитерские изделия», включающей более 200 SKU (торты, пирожные, наборы конфет, весовые десерты). Анализируемый период составил 256 дней, что соответствует требованию алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) к размеру выборки ($N = 2^n$).

Процесс анализа состоял из следующих шагов:

- Сбор и предобработка данных: Был сформирован исходный временной ряд продаж (рис.1). Поскольку в розничной торговле присутствует долгосрочный растущий тренд, ряд был центрирован (из фактических продаж вычтена линия линейного тренда). Это позволило привести ряд к стационарному виду и исключить искажения на низких частотах.
- Дискретное преобразование Фурье: С помощью математического алгоритма БПФ исходный временной ряд из временной области был переведён в частотную область. Каждая точка ряда трансформировалась в пару значений: действительную (Real) и мнимую (Imaginary) части комплексного числа.
- Расчёт амплитудного спектра: Чтобы уйти от комплексных чисел и оценить физическую силу колебаний, для каждой гармоники (k) была рассчитана её амплитуда (A) по формуле:

$$A = \sqrt{Real^2 + Imag^2}$$

Определение периодов сезонности: Номера гармоник были переведены в понятный для бизнес-анализа показатель — период циклическости спроса в днях (Т), по формуле $T = N/k$.

Индекс (t)	Дата	Продажи Кондитерских	Ряд без тренда	Комплексные числа (БПФ)	Амплитуда (A)	Гармоника (k)	Период (дней, T)
0	2026-01-01	180,72	30,72	46849,28+0.0i	46837,28	0	—
1	2026-01-02	193,97	43,72	-4,09+2581,48i	2700,307574	1	256,0
2	2026-01-03	196,13	45,63	179,83+1345,41i	1255,893458	2	128,0
3	2026-01-04	157,49	6,74	188,73+863,58i	845,7923412	3	85,3
4	2026-01-05	133,82	-17,18	174,63+724,91i	714,9524793	4	64,0
5	2026-01-06	114,11	-37,14	-59,67+705,54i	579,5076142	5	51,2
6	2026-01-07	125,10	-26,40	115,76+528,71i	495,2979519	6	42,7
7	2026-01-08	152,97	1,22	71,83+340,72i	513,7228456	7	36,6
8	2026-01-09	192,79	40,79	118,82-942,15i	968,7281231	8	32,0
9	2026-01-10	180,12	27,87	154,09+219,81i	377,1639629	9	28,4
10	2026-01-11	155,76	3,26	166,19+422,31i	387,4326683	10	25,6
11	2026-01-12	127,02	-25,73	51,48+391,36i	369,3433451	11	23,3
12	2026-01-13	114,93	-38,07	305,47+298,8i	324,2726176	12	21,3
13	2026-01-14	164,10	10,85	260,69+322,06i	378,291766	13	19,7
14	2026-01-15	195,37	41,87	99,04+320,85i	271,5987248	14	18,3
15	2026-01-16	210,39	56,64	271,9+308,41i	405,7426333	15	17,1
16	2026-01-17	198,62	44,62	115,16+504,69i	414,5848085	16	16,0
17	2026-01-18	143,62	-10,63	427,71+411,97i	555,0050188	17	15,1
18	2026-01-19	130,58	-23,92	1221,64+1437,17i	1857,653159	18	14,2
19	2026-01-20	98,80	-55,95	-343,98-334,33i	444,9849346	19	13,5
20	2026-01-21	121,80	-33,20	-249,02-13,35i	61,85233787	20	12,8
21	2026-01-22	157,08	1,83	-24,44+92,58i	70,82524126	21	12,2
22	2026-01-23	150,35	-5,15	25,25-57,7i	42,21092276	22	11,6
23	2026-01-24	179,95	24,20	75,0+78,87i	142,1832065	23	11,1
24	2026-01-25	141,06	-14,94	19,73+160,09i	161,5702411	24	10,7
25	2026-01-26	103,68	-52,57	-131,78+87,05i	193,0311503	25	10,2
26	2026-01-27	115,23	-41,27	109,52+265,44i	245,1244714	26	9,8
27	2026-01-28	168,30	11,55	28,88+52,62i	222,2900272	27	9,5
28	2026-01-29	182,20	25,20	160,25+130,84i	241,200903	28	9,1
29	2026-01-30	193,22	35,97	241,66+264,53i	266,7567103	29	8,8
30	2026-01-31	191,66	34,16	90,27+194,67i	179,4553148	30	8,5

Рис.1. Структура расчетной таблицы спектрального анализа Фурье в среде MS Excel

2. Результаты анализа (Интерпретация спектрограммы). По рассчитанным данным амплитуды и номеров гармоник (для первой половины спектра, k от 1 до 128) был построен график спектрального анализа. Математический алгоритм безошибочно выявил из хаотичного массива продаж два главных скрытых цикла спроса, которые дают самые высокие пики (максимальную амплитуду) на графике(Рис.2):

- Главный пик (на гармонике k = 37): При переводе в дни (256 / 37) даёт период ~7 дней. Это математически доказывает мощнейшую недельную сезонность категории кондитерских изделий. Спрос предсказуемо концентрируется вокруг пятницы и субботы (покупки к выходным и праздникам).

- Второй пик (на гармонике k = 18): Соответствует периоду ~14.2 дня. Это отражает полумесячную сезонность, жестко привязанную к экономическому поведению покупателей (циклы выплат авансов и заработных плат в ритейле).



Рис.2. Амплитудный спектр частот продаж категории 'Кондитерские изделия' с выраженными пиками сезонности (7 и 14 дней)

Как этот метод облегчает работу коммерческого департамента? Классические методы (например, простое скользящее среднее) сильно сглаживают графики и часто «пропускают» наложение разных циклов друг на друга. Применение БПФ радикально меняет качество аналитики и облегчает работу по следующим направлениям: Автоматизация планирования закупок (Управление запасами): Для кондитерских изделий с короткими сроками годности (ультрафреш: торты, пирожные) критически важно не привезти лишнего, чтобы товар не списался, и не привезти мало, допустив дефицит (Out-of-Stock). Зная точную силу 7-дневного и 14-дневного циклов, алгоритм автозаказа может автоматически закладывать +30% к поставке перед «зарплатными» выходными и снижать объём закупа в начале недели. Оптимизация логистики и цепочек поставок: Логистический центр сети может точнее распределять нагрузку на транспорт и персонал распределительных центров (РЦ). Зная, в какие дни недели и циклы месяца спрос на кондитерские изделия будет пиковым, графики отгрузок со складов синхронизируются с ритмами покупателей. Очистка данных от «шума» для долгосрочных прогнозов: БПФ позволяет провести обратное преобразование, предварительно «занулив» случайные мелкие частоты (шум от кратковременных промо-акций или плохой погоды). На выходе аналитик получает идеально чистый математический тренд, на основе которого прогнозы продаж на следующие 3–6 месяцев становятся точнее на 10–15%. Управление

ассортиментом (Управление категорией для 200+ SKU): Менеджер категории видит, что циклы стабильны для всей группы в целом. Это позволяет вводить гибкое календарное ценообразование и планировать масштабные промо-акции именно в противофазе (в периоды спада спроса), чтобы выравнять оборот магазина.

Заключение. Преобразование Фурье представляет собой эффективный инструмент анализа сезонных колебаний потребительского спроса в розничной торговле. Метод позволяет выявлять скрытые циклические закономерности, определять основные периоды сезонности и количественно оценивать их влияние на продажи.

Проведенный анализ показывает, что спектральное представление временных рядов дает возможность обнаруживать недельные, месячные и годовые циклы спроса, которые зачастую сложно выделить традиционными статистическими методами. Использование результатов преобразования Фурье способствует повышению точности прогнозирования, оптимизации товарных запасов и улучшению управления ассортиментом.

В условиях цифровой трансформации ритейла и роста объемов данных применение методов спектрального анализа становится перспективным направлением развития систем поддержки принятия решений. Дальнейшие исследования могут быть связаны с интеграцией преобразования Фурье и методов машинного обучения для создания гибридных моделей прогнозирования спроса [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. – Москва: ДМК Пресс, 2020. – 720 с.
2. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – Москва: Мир, 2019. – 496 с.
3. Оппенгейм А. В. Цифровая обработка сигналов / А. В. Оппенгейм, Р. В. Шафер. – Москва: Техносфера, 2015. – 1048 с.
4. Cooley J. W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series / J. W. Cooley, J. W. Tukey // Mathematics of Computation. – 1965. – Vol. 19, no. 90. – P. 297–301.
5. Хайндман Р. Прогнозирование временных рядов. Принципы и практика / Р. Хайндман, Дж. Атанасиопулос. – Москва: Диалектика, 2021. – 560 с.
6. Hyndman R. J. Forecasting: principles and practice / R. J. Hyndman, G. Athanasopoulos. – 3rd ed. – Melbourne: OTexts, 2021. – 442 p.

7. Бокс Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс, Н. Рейнсел. – Москва: Мир, 2019. – 720 с.
8. Чувькин Д. А. Спектральный анализ в задачах прогнозирования розничного спроса / Д. А. Чувькин // Логистика и управление цепями поставок. – 2022. – № 4. – С. 56–64.
9. Мастяева И. Н. Применение преобразования Фурье для анализа сезонности экономических показателей / И. Н. Мастяева, О. Н. Семенова // Экономический анализ: теория и практика. – 2021. – Т. 20, № 8. – С. 1442–1458.
10. Sezer O. B. Financial time series forecasting with deep learning: A systematic literature review / O. B. Sezer, M. U. Gudelek, A. M. Ozbayoglu // Applied Soft Computing. – 2020. – Vol. 90. – P. 106181.