

## ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ЕЖЕДНЕВНЫХ ОБЪЕМОВ РАБОТ ДЛЯ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Романович М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия (190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д.4), e-mail: r-marina21@rambler.ru

Проведен спектральный анализ процесса ежедневных средних объемов работ, выполняемых при строительстве типового монолитного жилого дома. Исходными данными послужили сведения о ежедневных средних объемах забетонированных конструкций за 4,5 месяца работы бригады. Программа, в которой проводились исследования, позволяет выполнять вычислительные операции с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. Основным условием реализации быстрого преобразования Фурье является количество значений в ряде данных равно степени двойки. В результате разложения исходный сигнал, представленный рядом данных, делится на постоянную составляющую и 32 гармонических колебания. При сложении различных гармонических колебаний получены различные приближения функции. Исследование поведения функции изменения ежедневных средних объемов работ с помощью различных приближений, при каждом последующем приближении, наглядно показывает малейшие изменения функции и позволяет определить на каком участке функции, и в какой момент времени такое изменение произошло. Все изменения, происходящие с функцией, сопоставимы с рабочим процессом и выявляют факторы, влияющие на изменение функции, на увеличение или уменьшение средних объемов работ.

Ключевые слова: спектральный анализ, средний объем работ, быстрое преобразование Фурье, календарное планирование

## APPLICATION OF SPECTRAL ANALYSIS OF PROCESS CHANGES DAILY AMOUNTS OF WORK FOR SCHEDULING

Romanovich M.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia (190005, Saint-Petersburg, 2-nd Krasnoarmeiskaya St., 4), e-mail: r-marina21@rambler.ru

The spectral analysis given about the daily average amounts of works which are carried out at construction of a standard monolithic house. Basic data are an average volumes of the concreted designs in day in 4,5 months of crew work. The program in which researches were conducted, performs computing operations with the help of algorithm of fast Fourier transform. The main condition of it's realization is the amount of values in a number of data equal to two degree. As a result of decomposition the initial signal shares on a constant component and 32 harmonic oscillations. At addition of various harmonic oscillations we receive various approximations of function. It is very conveniently to investigate behavior of function of change of daily average amounts of works with various approximations. Each subsequent approach shows the slightest changes of function, gives the chance to define on what site of function and in what timepoint such change happened. It is easy to compare all changes happening to function with working process and to reveal what factors influenced function change, on increase or reduction of average amounts of works.

Keywords: spectral analysis, average amounts of works, fast Fourier transform, scheduling

Весь строительный процесс представляет собой постоянно изменяющуюся во времени сложную параметрическую систему. Параметры строительного процесса, например, количество рабочих на строительной площадке, объем выполняемых работ, постоянно изменяют свои значения, создавая определенные колебания и отклонение значений параметров от определенной средней величины. Все изменения значений параметров можно представить в виде ряда данных.

Согласно изложенной гипотезе Ж. Б. Ж. Фурье, не существует функции, которую нельзя было бы разложить в тригонометрический ряд. Любой сигнал, представленный рядом данных, можно разложить на различные синусоидальные составляющие с различными частотами, вследствие чего можно определить, как возник первоначальный сигнал, по какому пути он следовал или, наконец, какому внешнему влиянию он подвергался. Таким образом, можно получить информацию для выяснения происхождения сигнала. Подобный метод анализа называется спектральным анализом или анализом Фурье [1, 2, 3, 4, 5, 6].

**Цель работы:** применение метода спектрального анализа для выявления изменений функции выполненных объемов работ и дальнейшей оптимизации календарного плана.

Рассмотрим дискретное преобразование Фурье (далее – ДПФ) и быстрое преобразование Фурье (далее – БПФ). Для реализации ДПФ необходимо конечное число входных данных  $N$ . Уравнение для получения  $N$ -точечного ДПФ имеет следующий вид [3]:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nk/N} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) [\cos(2\pi nk/N) - j \sin(2\pi nk/N)] \quad (1)$$

Также существует обратное дискретное преобразование Фурье (далее – ОДПФ), которое определяется как:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi nk/N} = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) [\cos(2\pi nk/N) + j \sin(2\pi nk/N)] \quad (2)$$

где  $N$  – количество значений сигнала за период, т.е. количество компонент разложения;

$x(n)$  – значения сигнала (в дискретных временных точках с номерами  $n = 0, \dots, N-1$ ), которые являются входными данными для прямого преобразования и выходными для обратного;

$X(k)$  – спектр исходного сигнала, состоящий из  $N$  комплексных амплитуд синусоидальных сигналов, в совокупности представляющих собой исходный сигнал, частотный выход ДПФ в  $k$ -той точке спектра, где  $k$  находится в диапазоне от 0 до  $N-1$ , что является выходными данными для прямого преобразования и входными для обратного.

Физический смысл дискретного преобразования Фурье состоит в том, чтобы представить некоторый дискретный сигнал в виде суммы гармоник. Параметры каждой гармоники вычисляются прямым преобразованием, а сумма гармоник – обратным [7]. Набор гармоник, выделенных в сигнале – это и есть спектр. Каждая гармоника характеризуется тремя параметрами: амплитудой, частотой и фазой.

БПФ по сути является алгоритмом для ДПФ для упрощения и сокращения количества вычислений, которые необходимо проделать при ДПФ. В БПФ число вводимых данных сигнала ограничивается условием:

$$N = 2^k, \quad (3)$$

где  $k$  – значение степени. Таким образом, в системе БПФ можно обрабатывать сигналы с количеством данных 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 и т.д. [8]

Используем БПФ для анализа данных о ежедневных средних объемах работ, выполняемых при строительстве типового монолитного жилого дома. Исходными данными являются сведения о средних объемах забетонированных конструкций в день за 4,5 месяца работы бригады (таблица 1). Пусть  $x(n)$  – значение выполненного объема работ в  $n$ -ый день работы бригады, где  $n = 0, \dots, N-1$ . Количество значений в ряде данных принимаем  $N=128$ , что, в свою очередь, удовлетворяет условию (3) для БПФ. В ряд данных не вошли нулевые значения объемов работ, относящиеся к предпраздничным и праздничным дням (конец декабря, начало января). В программе TableCurve 2D v5.01 с помощью аппарата БПФ (FFT – Fast Fourier transform) разложим исходный сигнал, представленный рядом данных таблицы 1, в ряд Фурье. В результате разложения сигнал делится на постоянную составляющую и 32 гармонических колебания или просто 32 гармоники. Каждая гармоника характеризуется своим периодом, частотой и амплитудой. Функция, получаемая в результате сложения нескольких гармоник, называется приближающей функций, а сама операция – приближением. Таким образом, сложив постоянную составляющую и первую гармонику, получили первое приближение, а сложив 10 первых гармоник и постоянную составляющую, получили десятое приближение и т. д. Суммируя все гармоники, получили саму функцию во временной области и частотную область (рисунки 1, 2). Значения частот от низких до высоких расположены по оси абсцисс. По оси ординат могут быть расположены значения амплитуд гармоник, значения фаз, магнитуд или мощностей сигнала.

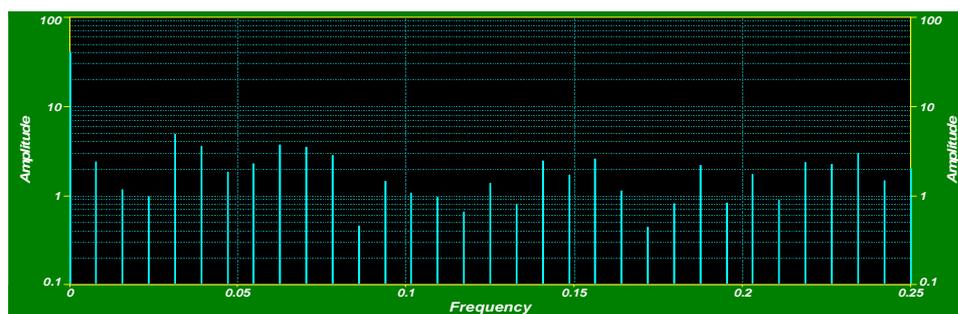


Рис. 1. Частотная область сигнала



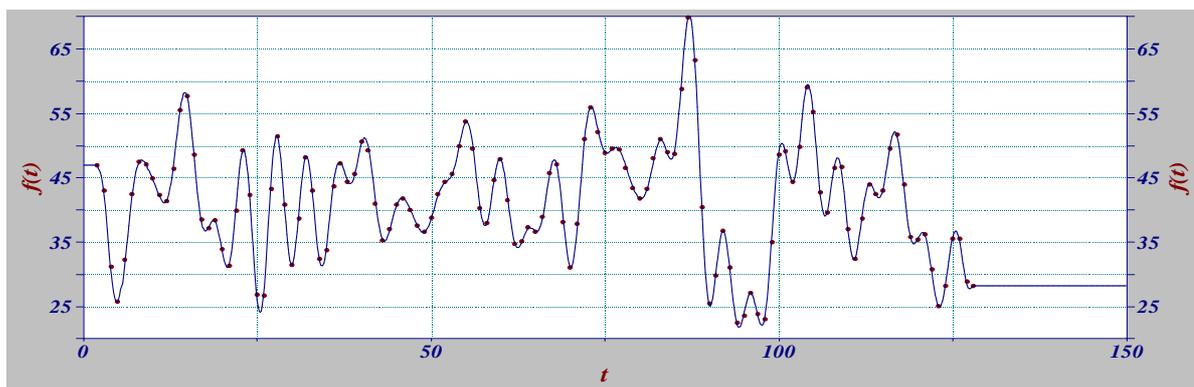


Рис. 2. Временная область сигнала

В таблице 2 представлены вычисленные коэффициенты Фурье для 32 гармоник.

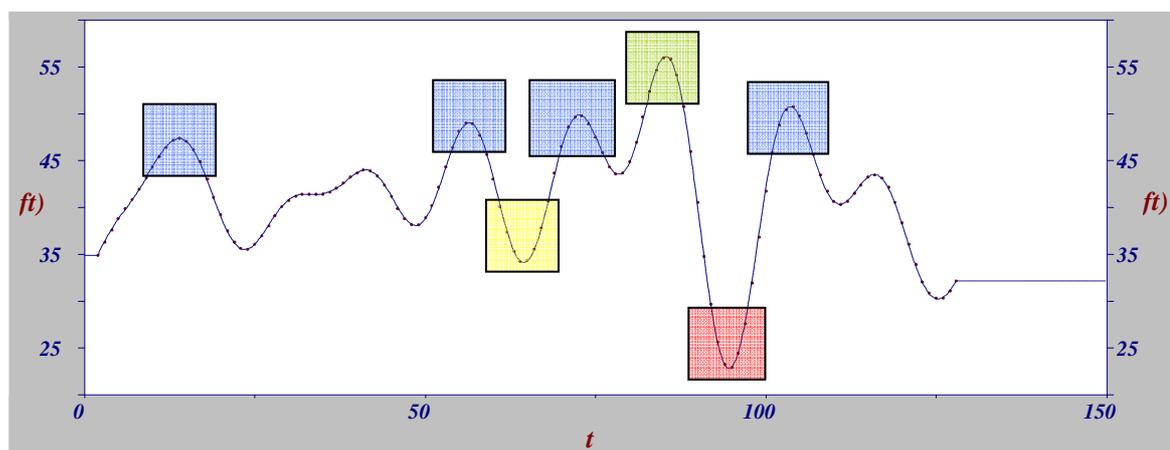
Таблица 2

Коэффициенты Фурье

№ п/п	Частота	Re	Im	Амплитуда	Фаза
0	0	2651.77000	0	41.4339062	1.57079633
1	0.00781250	-78.550429	5.06918233	2.45980707	4.64794423
2	0.01562500	5.00610313	-37.887801	1.19428429	0.13136872
3	0.02343750	-24.100512	20.9409674	0.99773122	3.99702354
4	0.03125000	-120.57205	-104.02188	4.97632778	5.42423076
5	0.03906250	35.8816812	-112.10316	3.67830083	0.30977309
6	0.04687500	-27.640989	53.6500762	1.88599768	3.61733311
7	0.05468750	-54.315160	51.4205059	2.33732558	3.95436031
8	0.06250000	-52.475582	-110.32941	3.81790931	5.83922600
9	0.07031250	110.789229	28.0777290	3.57161829	1.81900413
10	0.07812500	57.6683230	71.9255517	2.88092468	2.46576852
11	0.08593750	4.85844055	-14.080591	0.46547552	0.33225396
12	0.09375000	24.1514833	40.6963578	1.47885080	2.60599907
13	0.10156250	-34.009350	7.58815469	1.08892507	4.49286499
14	0.10937500	25.5173791	-18.420435	0.98348127	0.94553753
15	0.11718750	-20.263445	7.23360158	0.67237060	4.36951136
16	0.12500000	-40.376667	19.9933333	1.40798802	4.25261245
17	0.13281250	15.9083052	20.7492608	0.81705813	2.48749358
18	0.14062500	80.2351443	-1.6100050	2.50785300	1.55073294
19	0.14843750	5.30348153	55.6189249	1.74597520	3.04652618
20	0.15625000	62.7938613	-55.863471	2.62644982	0.84373864
21	0.16406250	35.6106909	-10.043854	1.15625013	1.29589135
22	0.17187500	1.94379055	-14.243125	0.44922342	0.13563430
23	0.17968750	-21.371911	-15.765532	0.82992763	5.34795555
24	0.18750000	64.1660585	-30.858936	2.22502567	1.12252643
25	0.19531250	25.1921952	9.37592445	0.84001178	1.92708866
26	0.20312500	4.54565788	-56.842968	1.78201354	0.07979888
27	0.21093750	8.96997791	-27.880476	0.91524708	0.31127121
28	0.21875000	-67.249483	38.0944866	2.41530011	4.19699254
№ п/п	Частота	Re	Im	Амплитуда	Фаза

29	0.22656250	72.2349457	-8.5609787	2.27314007	1.45283084
30	0.23437500	95.6388766	-14.868405	3.02461648	1.41656692
31	0.24218750	46.0904315	13.8648538	1.50408365	1.86300386
32	0,25	-132.41667	0	2.06901042	4.71238898

Исследование поведения функции изменения ежедневных средних объемов работ с помощью различных приближений, при каждом последующем приближении наглядно показывает малейшие изменения функции и позволяет определить, на каком участке функции и в какой момент времени такое изменение произошло. Все изменения, происходящие с функцией легко сопоставить с рабочим процессом, т. к. значения функции можно определить в каждой точке периода (в нашем случае это 4,5 месяца) как для любого приближения, так и для итоговой функции. Рассмотрим 10-е приближение функции и выделим зоны максимальных отклонений (рис. 3).

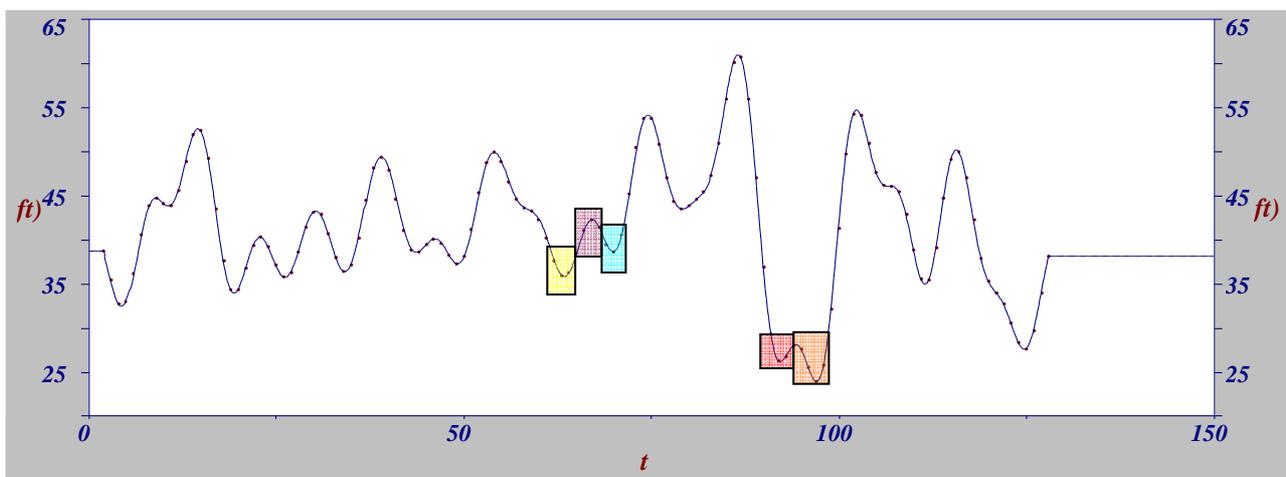


*Рис. 3. Поведение функции при десятом приближении*

На основании собранных за исследуемый период времени статистических данных о погодных условиях на строительной площадке, работе строительной техники (поломке/плановой настройке), задержке в поставках строительных материалов, о графике движения рабочих, построенном на основании таблиц учета рабочего времени, можно проанализировать причины отклонений значений выполненных объемов работ. Минимальные значения среднего объема работ (красная зона) приходятся на начало января с 5-го по 14-й день. В данный промежуток времени имели место задержки в поставках бетона, неблагоприятные погодные условия. Количество рабочих было оптимальным, однако, выработка после праздничных дней оказалась очень низкой. Меньшее падение значений среднего объема работ относится к началу декабря с 1-го по 8-й день (желтая зона). В этот период времени происходило обесточивание строительной площадки дважды, продолжительностью отсутствия электроэнергии в течение 1-го часа. Также произошла

поломка крана, который не работал в течение суток. Максимальное увеличение среднего объема работ (зеленая зона) приходится на конец декабря. В данный период времени работало максимальное количество рабочих с максимальной выработкой. Это связано с необходимостью завершения и сдачи определенного объема работ в конце периода. Другие пики увеличения среднего объема выполняемых работ (синяя зона) приходились на 7-17 октября, 23-29 ноября, 10-16 декабря, 16-22 января. В эти периоды наблюдалось увеличение количества рабочих.

Каждое последующее приближение дает возможность изучить поведение функции более детально и разбить ранее рассмотренные зоны на более мелкие, включающие в себя период времени от 3-х до 5-ти дней. На рисунке 4 показано семнадцатое приближение исследуемой функции, где ранее рассмотренную красную зону можно детализировать, разбив, например, на две подзоны. и проанализировать факторы, влияющие на изменение среднего объема работ в каждой подзоне. Аналогично желтую зону можно разбить на три подзоны. Увеличивая или уменьшая количество приближений, можно задать различную степень детализации функции: для обобщенного анализа, например, за период времени равный неделе, и для частного анализа, например, за период времени от трех до пяти дней.



*Рис. 4. Поведение функции при десятом приближении*

#### **Выводы:**

1. В работе проведен спектральный анализ изменений значений средних объемов работ за 4,5 месяца.
2. Спектральный анализ позволяет рассмотреть поведение функции изменения средних объемов работ в нескольких вариантах: укрупненный анализ, для отображения общих зависимостей и причин изменения средних объемов работ, и детальный анализ, позволяющий определить точные факторы, влияющие на изменения значений за определенный узкий промежуток времени.

3. Спектральный анализ позволит прогнозировать дальнейшее поведения функции изменения средних объемов работ в зависимости от факторов, влияющих на нее, а также корректировать календарный план работ, регулируя внешние и внутренние факторы, влияющие на ход строительного процесса.

### Список литературы

1. Айфичер Э. С. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Э. С. Айфичер, Б. У. Джервис; пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.
2. Залманзон Л. А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / Л. А. Залманзон. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
3. Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешенной обработки сигналов / У. Кестер; пер. с англ. А. А. Власенко. – М.: Изд-во: Техносфера, 2010. – 328 с.
4. Лэй Э. Цифровая обработка сигналов для инженеров и технических специалистов: практическое руководство / Эдмунд Лэй; пер. Н. С. Соголюб. – М.: ООО Группа ИДТ, 2007. – 336 с.
5. Раушер К. Основы спектрального анализа / К. Раушер, Ф. Йанссен, Р. Минихольд; пер. с англ. С. М. Смольного. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 224 с.
6. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: учебник для ВУЗов / А. Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2006. – 751 с.
7. Черторийский А. А. Спектральные методы: методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Обработка сигналов спектральными методами» / А. А. Черторийский. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 32 с.
8. Юкио Сато. Без паники! Цифровая обработка сигналов / Юкио Сато; пер. с яп. Т. Г. М. Селиной. – М.: Додэка-XXI, 2010. – 176 с.

### Рецензенты:

Барабанщиков Ю.Г., д.т.н., профессор кафедры строительства уникальных зданий и сооружений Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург;

Величкин В.З., д.т.н., профессор кафедры строительства уникальных зданий и сооружений Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург.