

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

**Моделирование работы энергосети с динамическими потребителями
ансамблем фазовых осцилляторов с инерцией**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4061 группы
направления 11.03.02 Инфокоммуникационные
технологии и системы связи

Института физики

Куприянова Владислава Дмитриевича

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н., профессор _____ Т.Е. Вадивасова

Зав. кафедрой радиофизики

и нелинейной динамики,

д.ф.-м.н., доцент _____ Г.И. Стрелкова

Саратов 2023 г.

Введение

Явления нелинейной динамики и нелинейных процессов имеют повсеместный характер и встречаются как в природных физических явлениях, так и в технике.

Одним из новых направлений в области динамических систем и нелинейных процессов представляют исследования энергетических сетей. В простом виде энергосети представляют собой сеть взаимосвязанных генераторов, демонстрирующих коллективное поведение под влиянием синхронизации.

Энергосети являются сложными структурами и состоят из множества различных элементов. К таким элементам можно отнести непосредственно сами генераторы энергии, трансформаторы напряжения, потребители энергии и линии передач, по которым происходит распространение энергии.

Элементы энергосети могут описываться в виде фазовых осцилляторов первого и второго порядка.

Ансамбль связанных фазовых осцилляторов может демонстрировать эффекты синхронизации такие как: фазовая синхронизация, уединённые и химерные состояния. Анализ режимов синхронизации позволяет произвести оценку устойчивости ансамбля осцилляторов, что является важным фактором работы энергосети.

Цели выпускной квалификационной работы следующие: построение карты режимов от зависимости величины дисперсии случайных величин начальных условий фаз, скоростей осцилляторов, определение различных режимов работы энергосети; рассмотрение динамики пространственно-временных структур в зависимости от случайного разброса величин начальных условий.

Теоретическая часть

Исследуемая модель

В работе исследуется энергосеть из 30 элементов сети, среди которых: генераторы, трансформаторы и потребители энергии (рис 1).

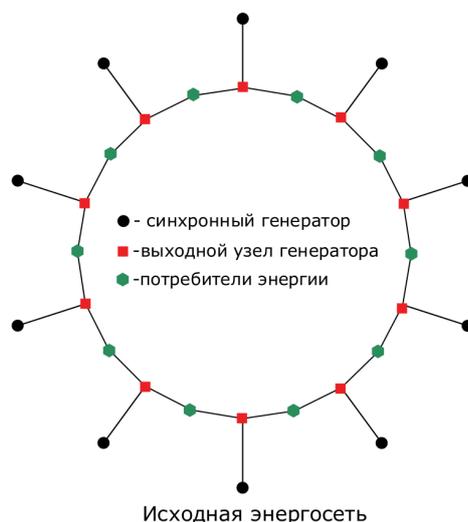


Рисунок 1. Исходная сеть с кольцевой топологией.

Генераторы энергии подключены к трансформаторам сети. В свою очередь трансформаторы подключены к потребителям энергии в виде кольца чередующихся элементов. В качестве численной модели используется модель с динамическими потребителями в энергосети.

Рассмотрим уравнение, которое описывает данную модель. Особенность данной модели состоит в рассмотрении коллективной динамики генераторов с учётом изменяемой динамики потребителей. В исследуемой модели генераторы и потребители представлены в виде ансамбля связанных ротаторов, которые описываются следующими уравнениями:

для элементов сети, представляющих генератор,

$$\frac{2H_i}{\omega_R} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + \frac{D_i}{\omega_R} \frac{d \delta_i}{dt} = A_i^g - K_{i,i+n_g}^g \sin(\delta_i - \delta_{i+n_g}), i = 1, \dots, n_g, \quad (1)$$

$$A_i^g = P'_{g(active,i)}, \quad (2) \quad K_{i,i+n_g}^g = |E_i V_i / x'_i|, \quad (3)$$

и элементов представляющих потребителей,

$$\frac{D_i}{\omega_R} \frac{d\delta_i}{dt} = A_i - \sum_{j=n_g+1, j \neq i}^N K_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}), i = n_g + 1, \dots, N, \quad (4)$$

$$A_i = -P'_{c(active,i')} - |V_i|^2 G_{ii}, \quad (5)$$

Параметр A_i^g представляет собой безразмерную мощность i -го генератора, тогда как A_i является безразмерной мощностью потребления с учётом потерь в энергосети, выраженную через произведение модуля квадрата безразмерного напряжения узла V_i и действительной части G_{ii} комплексной матрицы проводимости Y . Параметр K_{ij}^g и K_{ij} задаёт силу связи между осцилляторами с номерами i и j . Параметр γ_{ij} характеризует фазовый сдвиг в цепи связи потребителей сети.

Практическая часть

Для практического исследования энергосети используем следующие входные параметры исходной энергосети:

Характеристики генераторов							Характеристики потребителей		
x'_i	H_i	D_i	$P_{g(active,i)}$	$P_{g(reactive,i)}$	$V_{g,i}$	ω_R	$P_{c(active,i)}$	$P_{c(reactive,i)}$	$V_{c,i}$
0.0608	4.4	50	200	0	1.04	314.15 рад/с	200	0	1.04

Таблица 1. Входные параметры исходной энергосети.

x'_i = величина паразитной индуктивности генератора, $H = 4.4$ - коэффициент инерции осцилляторов относящиеся к генераторам, $D=50$ - коэффициент диссипации для всех осцилляторов, $P'_{g(active,i)}$ и $P'_{c(active,i)}$ - активная мощность генератора и потребителя соответственно, V_i = безразмерное напряжение узла сети, ω_R — синхронная угловая частота (в рад/с). Для потребителей этого коэффициента нет, т.к. уравнение для них первого порядка без инерции.

Исследование карты режимов в случае различных величин дисперсий случайных начальных условий

В качестве численного эксперимента в работе производится построение карты режимов ансамбля фазовых осцилляторов. Построение производилось с помощью численного метода Гюна второго порядка с шагом интегрирования равном $h = 0,01$. Время численного интегрирования уравнений составляет $T = 200$ из них первые сто единиц времени отсеяны во избежание влияния переходных процессов в динамики ансамбля фазовых осцилляторов. При построении карты режимов были использованы 51 вариант различных начальных условий, выбранных случайным образом в заданном диапазоне $\delta \in [-\pi; \pi]$ рад. и $\dot{\delta} \in [-100; 100]$ рад/с. Случайный разброс δ_i и ω_i производился по следующим уравнениям:

$$\delta_i = 0 + d_\delta \xi_1 \quad (15)$$

$$\omega_i = 0 + d_\omega \xi_2 \quad (16)$$

где d_δ и d_ω – величины дисперсии начальных фаз и частот осцилляторов, ξ_1 и ξ_2 независимые источники случайных чисел, имеющие гауссовское распределение величин.

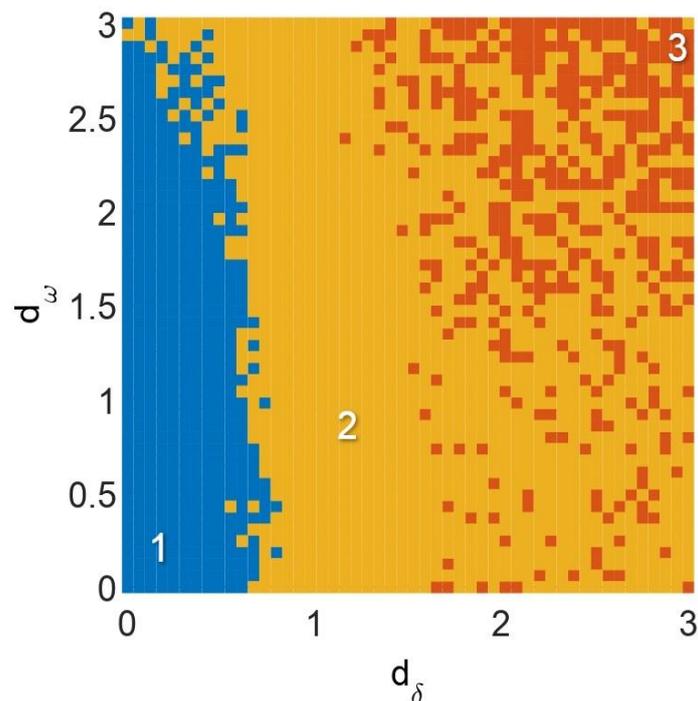


Рисунок 2. Карта режимов сети фазовых осцилляторов на плоскости управляющих параметров d_δ - значение дисперсии случайной величины угла поворота дельта, d_ω - значение дисперсии величины мгновенной частоты вращения омега, при постоянном параметре диссипации $D_i = 50$: 1 – область синхронного режима; 2 - область сосуществования синхронного и несинхронного динамического режима; 3 – область несинхронного поведения одного или нескольких осцилляторов.

Карта режимов, полученная для сети фазовых осцилляторов (1, 4), приведена на рис. 2. Построение карты режимов производилось при изменении величины дисперсии разброса начальных условий. По горизонтальной оси представлен безразмерный параметр дисперсии для случайных величин начальных фаз осцилляторов, тогда как по вертикальной оси установлен параметр дисперсии начальных частот осцилляторов. На карте выделены три области с различной динамикой сети, которые показаны разными цветами. В области 1 для всех начальных условий устанавливается синхронный режим. При этом для всех осцилляторов средняя частота $\langle \delta_i \rangle_t$ равна нулю. Это означает, что все роторы в сети вращаются с одной и той же средней частотой $\langle f_i \rangle_t$, совпадающей с опорной частотой ω_R .

В области 2 наблюдается режим сосуществования синхронного и несинхронного динамического поведения осцилляторов. При этом в случае одних случайных начальных условиях устанавливается режим фазовой синхронизации, а при других – асинхронный режим осцилляторов. Наконец, в области 3 при любых случайных начальных условиях имеет место несинхронный режим, когда для одного или нескольких осцилляторов средняя частота $\langle \delta_i \rangle_t$ отлична от нуля.

Пространственно-временные режимы ансамбля фазовых осцилляторов

Рассмотрим различные режимы пространственно-временной динамики ансамблей фазовых осцилляторов, полученные при фиксированных значениях

величины дисперсии начальных фаз и частот. Выберем значения дисперсии случайной величины угла поворота δ равной $d_\delta = 1$, и значения дисперсии величины частоты вращения ω как $d_\omega = 2$. Для исследования различных пространственно-временных динамик ансамбля в разделе будут представлены пространственно-временные диаграммы мгновенных частот осцилляторов. В разделе также будут представлены различные временные реализации параметра фазовой когерентности ансамбля осцилляторов и определены собственные частоты осцилляторов и усреднённые мгновенные частоты осцилляторов.

Режим фазовой синхронизации

В данном разделе рассмотрим режим работы энергосети, при которой наблюдается динамический режим фазовой синхронизации осцилляторов.

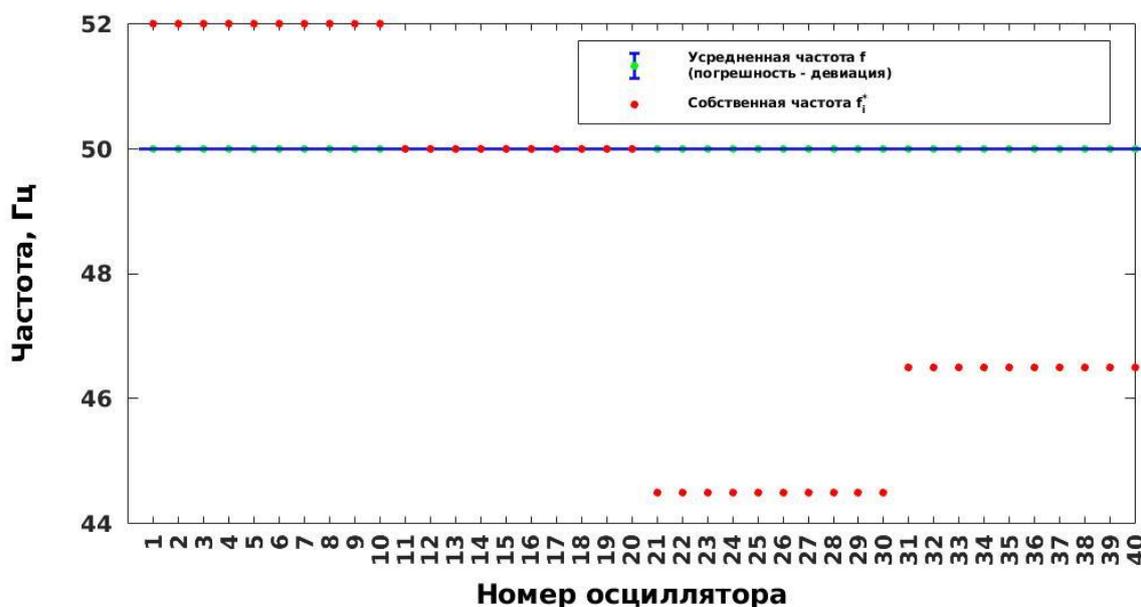


Рисунок 3. Диаграмма собственных частот и усредненных по времени мгновенных частот осцилляторов для режима фазовой синхронизации.

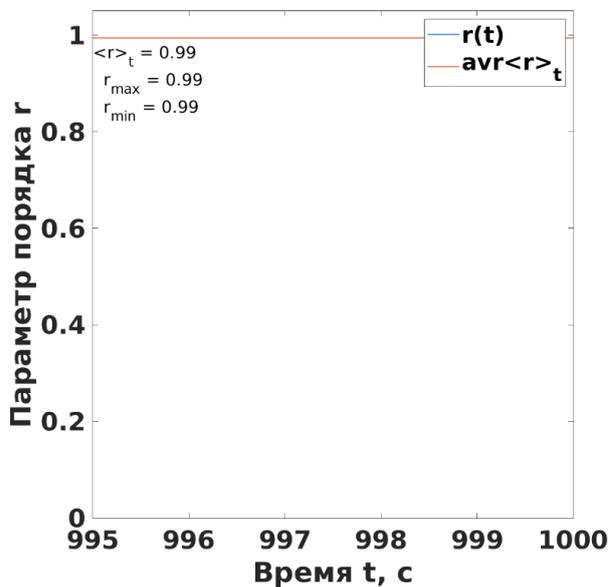
Рисунок 3 демонстрирует усреднённые мгновенные частоты осцилляторов $\langle f \rangle_t$ (зеленая точка) и собственные частоты осцилляторов (красная точка), рассчитанные по формуле $f_i^* = \frac{\omega_R}{2\pi} \left(1 + \frac{A_i}{D}\right)$. На данном рисунке представлены 40 осцилляторов, мгновенная частота, каждый из которых осциллирует на

опорной частоте сети равной $f_R = \frac{\omega_R}{2\pi} = 50$ Гц. Имеющиеся осцилляторы представляют различные собственные частоты, которые можно поделить на 4 кластера. У каждого кластера наблюдается своя общая собственная частота осциллятора, которая определяется выбором параметра собственной мощности A_i . Из рисунка 5 видно, что собственные частоты одного из кластеров совпадают с мгновенной усреднённой частотой всех осцилляторов ансамбля. Осцилляторы данного кластера принадлежат выходным узлам генераторов и имеют значения собственных частот равные $A_{11 \leq i \leq 20} = 0$. Осцилляторы с номерами $1 \leq i \leq 10$ относятся к внутренним узлам генераторов, которые представляют вращающуюся часть генератора (ротор синхронной машины). Для данного типа узлов собственная частота осциллятора определена выше, чем опорная частота сети $f_i^* > f_R$, а собственная мощность определена больше нуля $A_{1 \leq i \leq 10} > 0$. В случае элементов, связанных с потреблением, параметр $A_i < 0$, а собственная частота осцилляторов становится $f_i^* < f_R$. Осцилляторы, характеризующиеся такими величинами собственных частот, представлены под номерами $21 \leq i \leq 40$.

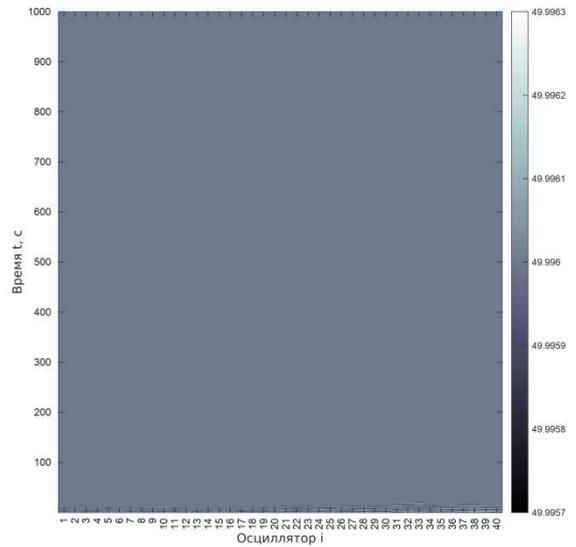
На рисунке 4 показан график зависимости параметра фазовой когерентности r осцилляторов от времени для синхронного режима. Параметр r представляет фазовую когерентность совокупности осцилляторов, которая рассчитывается как:

$$r e^{i\chi} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j} \quad (17)$$

где χ определяет среднее значение фазы ансамбля, θ_j - фаза отдельного осциллятора, r – показатель фазового порядка ансамбля осцилляторов.



(а)



(б)

Рисунок 4. Зависимость величины фазовой когерентности r фазовых осцилляторов системы от времени (а), пространственно-временная диаграмма частот осцилляторов (б).

Как можно увидеть из рисунка 4(а), уровень фазовой когерентности не изменяется с течением всего времени. Оранжевой линией на рисунке 4 представлено усреднённое значение величины r от времени счета. Усредненное значение в случае фазовой синхронизации определённо на уровне $avr(r)_t \approx 1$, что говорит о полном отсутствии расстройке мгновенных фаз осцилляторов. На рисунке 4(б) представлена пространственно-временная диаграммы мгновенных частот осцилляторов. Диаграмма 4(б) подтверждает наличие фазовой синхронизации ансамбля осцилляторов.

Режим уединённых состояний

Следующий рассматриваемый режим синхронизации является режим уединённых состояний, ансамбля фазовых осцилляторов с инерцией.

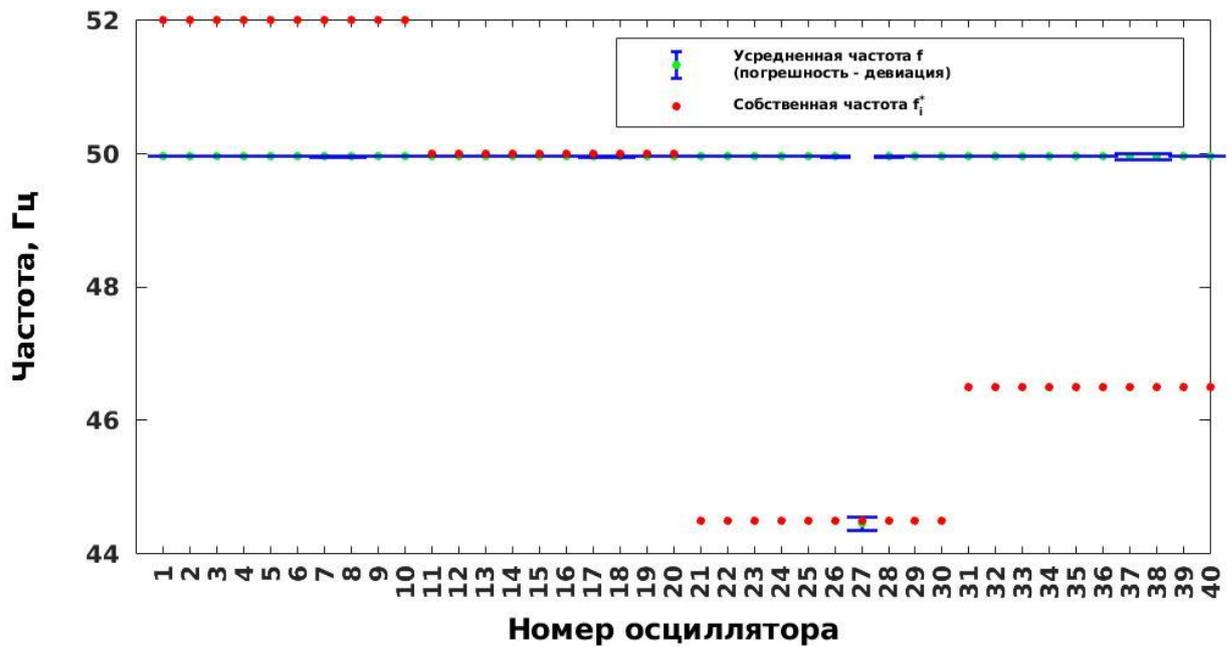
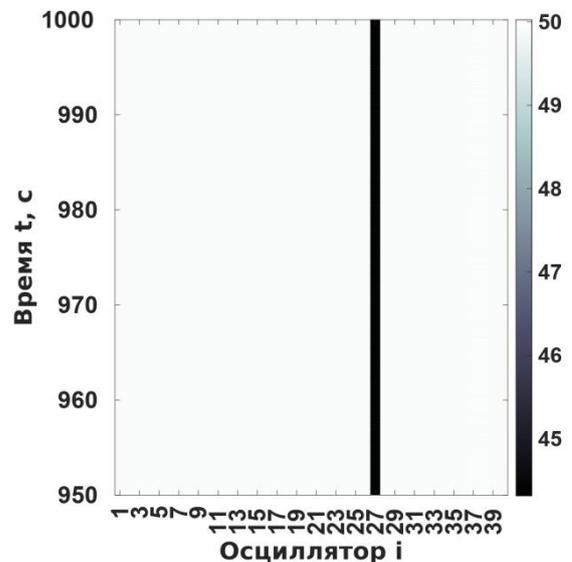
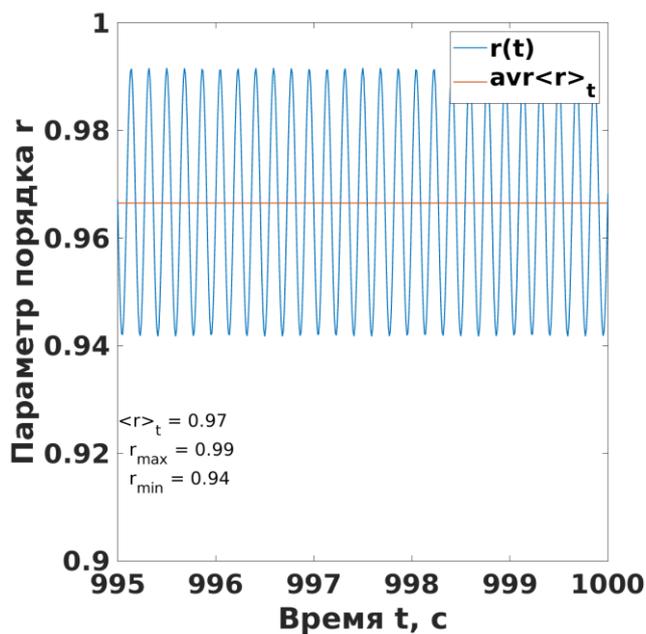


Рисунок 5. Диаграмма собственных частот и усредненных по времени мгновенных частот осцилляторов для режима уединенного состояния.

На рисунке 5, в сравнении с рисунком 3, происходит срыв мгновенной частоты у одного из осцилляторов. Как можно увидеть это осциллятор под номером $i = 27$. Как видно из рисунка 5 остальной кластер осцилляторов продолжает работу на опорной частоте сети. Также можно заметить, что осцилляторы под номером $i = 37, 38$ имеют малую величину девиации мгновенной частоты.



(a)

(б)

Рисунок 6. Зависимость величины фазовой когерентности фазовых осцилляторов системы от времени (а), пространственно-временная диаграмма мгновенных частот осцилляторов (б).

Как можно увидеть из рисунка б(а) уровень фазовой когерентности меняется с течением всего времени. Фазовая когерентность r изменяется по времени в пределах $0.94 \leq r \leq 0.99$ на промежутке всего времени счета. Усредненная величина уровня фазовой когерентности составляет примерно $avr(r)_t = 0.97$, система демонстрирует режим уединённых состояний в течение всего времени наблюдения установившегося режима. На пространственно-временной диаграмме мгновенных частот (рисунок б(б)), видно, что мгновенная частота осциллятора под номером $i = 27$ отлична от остального кластера осцилляторов, усредненное значение мгновенной частоты из рисунка 6 составляет $\langle f_{28} \rangle = 44,5$ Гц. Также из рисунка 5 можно установить, что осциллятор $i = 27$ имеет малую девиацию мгновенной частоты.

Химерный режим

Рассмотрим случай, когда в системе реализуется пространственно-временной режим химерных состояний.

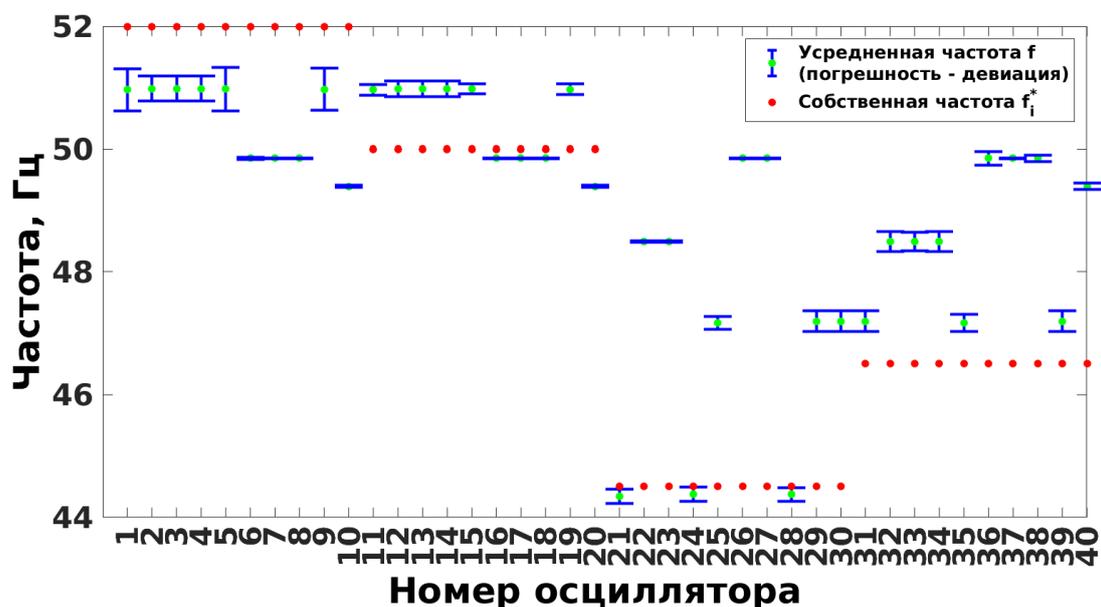


Рисунок 7. Диаграмма усреднённых по времени частот осцилляторов.

На представленном рисунке 7, мы можем наблюдать более сложное поведение усредненных мгновенных частот осцилляторов в сравнении с уединенными режимом. На рисунке 7 видно, что большое количество осцилляторов перестают вращаться на опорной частоте энергосети f_R и все больше начинают находиться в различных когерентных кластерах. Также на рисунке 7 можно заметить, что наибольшая девиация частоты наблюдается в осцилляторах, чьи значения усреднённых мгновенных частот находятся между значениями опорной частоты f_R и их собственными частотами f_i^* .

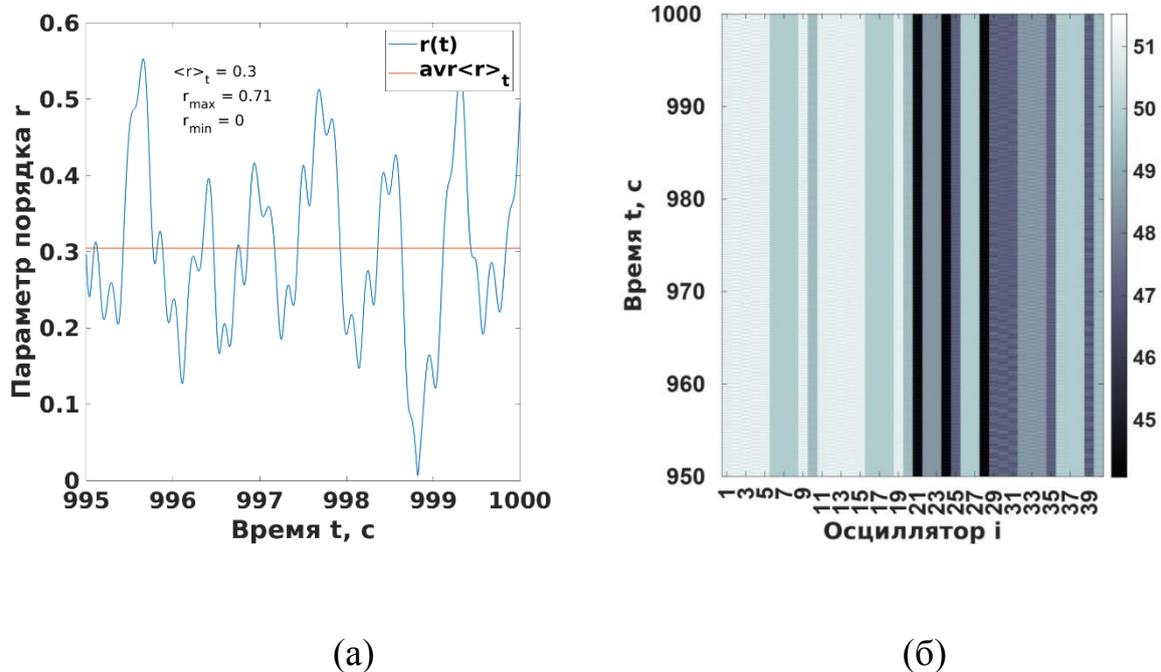


Рисунок 8. Зависимость величины фазовой когерентности фазовых осцилляторов системы от времени (а), пространственно-временная диаграмма мгновенных частот осцилляторов (б).

В пространственно-временном режиме химерного состояния уровень фазовой когерентности (рисунок 8(а)) изменяется следующим образом: фазовая когерентность r изменяется во времени в пределах $0 \leq r \leq 0.71$ на промежутке всего времени счета, а усреднённая величина параметра фазовой когерентности

составляет примерно $avr(r)_t = 0.3$. На рисунке 8(б) показана пространственно-временные диаграмма мгновенных частот, на которой отчётливо видна различное поведение кластеров когерентности во времени.

Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы была рассмотрена идеализированная энергосеть с динамическими потребителями в виде модели фазовых осцилляторов с инерцией.

В качестве численного эксперимента в работе производилось построение карты режимов ансамбля фазовых осцилляторов. На плоскости управляющих параметров были выделены три области, соответствующие трём режимам работы сети: синхронный режим, режим сосуществования синхронного и асинхронного поведения ансамбля, и асинхронный режим.

Для полученной карты режимов производилось рассмотрение динамики пространственно-временных структур в зависимости от случайного разброса величин начальных условий. В частности, при заданных управляющих параметрах системы в рассматриваемом ансамбле фазовых осцилляторов наблюдали следующие пространственно-временные режимы: режим фазовой синхронизации осцилляторов, режим уединённых и химерных состояний.

Для анализа полученных пространственно-временных режимов производились построения: диаграмма усреднённых по времени частот осцилляторов, зависимость величины фазовой когерентности фазовых осцилляторов системы от времени, пространственно-временная диаграмма мгновенных частот осцилляторов.