

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

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

**Влияние неоднородной мощности на фазовую динамику осцилляторов с
инерцией**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4061 группы
направления 11.03.02 Инфокоммуникационные
технологии и системы связи
Института физики
Ульяниной Дарьи Викторовны

Научный руководитель

ассистент, инженер

П.А. Аринушкин

Зав. кафедрой радиофизики

и нелинейной динамики,

д.ф.-м.н., доцент

Г.И. Стрелкова

Саратов 2023 г.

Введение. В настоящее время ведутся активные исследования в области использования новых источников энергии и построения энергосистем, которые могут быть более эффективными и надежными. Одним из наиболее ключевых вопросов в этой сфере является моделирование неоднородной мощности генераторов энергосети.¹

Актуальность данной темы обусловлена тем, что в настоящее время все большее внимание уделяется исследованию энергосетей с различным типом генераторов энергии, которые вносят неоднородность в баланс генерируемых мощностей. Исследование данного направления важно для понимания работы энергосистем и предотвращения потенциальных проблем, связанных с неоднородностью мощности генераторов. Таким образом, исследование данной темы позволит лучше понять причины и последствия энергетических сбоев энергосети и исследовать условия, при котором данные причины наблюдаются.

В этой работе будет рассмотрена простая кольцевая энергосеть в случае различного разброса активной мощности генерирующих узлов. Будет представлена математическая модель фазовых осцилляторов с инерцией, которая позволяет моделировать генерирующие узлы, устраняя при этом рассмотрение узлов потребителей². Также будут представлены результаты численного моделирования энергосети в случае различной дисперсии величины активной мощности осцилляторов. Наконец, будут рассмотрены пространственно-временные диаграммы ансамбля фазовых осцилляторов в

¹ S. N. Dorogovtsev, A. V. Goltsev, and J. F. F. Mendes. Critical phenomena in complex networks // *Rev. Mod. Phys.*, 2008, V. 80, P. 1275–1335.

² Strogatz Steven. Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences // *Physics Today*. — 2003. — Vol. 56. — P. 47.

Inter-layer synchronization in multiplex networks / Ricardo Sevilla-Escoboza,

Irene Sendina-Nadal, I Leyva et al. // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. — 2015. — Vol. 26.

случае различной асинхронной динамики энергосети. Для решения данных задач будут проведены исследования ансамбля фазовых осцилляторов с инерцией и проведен анализ полученных данных.

Цель дипломной работы состоит в исследовании особенностей фазовой синхронизации осцилляторов второго порядка, моделирующих работу энергосети в случае неоднородного распределения активной мощности генераторов энергосети.

В качестве исходной модели в данной работе исследуется энергосеть из 30 элементов сети, среди которых: генераторы и потребители энергии. Генераторы энергии представлены в виде двух последовательно связанных элементов: внутреннего узла, представляющего работу ротора синхронной машины и внешнего узла, представляющий выход статора синхронной машины. Внешний узел синхронной машины подключается к потребителям энергии в виде кольца чередующихся элементов. В работе используется численная модель взаимодействия связанных синхронных машин энергосети. Модель описывает динамику энергосети дифференциальными фазовыми уравнениями второго порядка (ротатор с инерцией). В дипломной работе исследуется динамика пространственно-временных структур в зависимости от случайного разброса величин активной мощности при нескольких значениях реактивной мощности генераторов энергосети. Также в работе определяются различные режимы работы энергосети и приводятся статистические характеристики и характеристики степени фазовой когерентности ансамбля связанных осцилляторов энергосети.

Основное содержание работы. В исследуемой модели генераторы представлены в виде ансамбля связанных ротаторов, которые описываются следующими уравнениями³:

$$\frac{2H_i}{\omega_R} \frac{d^2\delta_i}{dt^2} + \frac{D_i}{\omega_R} \frac{d\delta_i}{dt} = A_i - \sum_{j=1, j \neq i}^{n_g} K_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}), \quad i = 1, \dots, n_g, \quad (1)$$

$$A_i^g = P_{g(active,i)} - |E_i|^2 G_{ii}, \quad (2)$$

$$K_{ij} = |E_i E_j Y_{ij}|, \quad (3)$$

$$\gamma_{ij} = \alpha_{ij} - \frac{\pi}{2}, \quad (4)$$

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| e^{j\alpha_{ij}}, \quad (5)$$

где ω_R — синхронная угловая частота (в рад/с), δ_i — мгновенный угол вращения ротора i -го осциллятора относительно синхронной оси; H_i (в секундах) и D_i — параметры инерции и диссипации i -го генератора, соответственно. Проводя нормировку мощностей потребителей и генераторов на величину S_{rated} , правые части уравнения (1) являются безразмерными. Параметр A_i (2) представляет собой безразмерную мощность i -го генератора с учетом потерь в энергосети, выраженную через произведение модуля квадрата безразмерного ЭДС E_i и действительной части G_{ii} комплексной матрицы проводимости \mathbf{Y} . $P_{g(active,i)}$ — нормированная на величину S_{rated} , активная мощность генератора. Параметр K_{ij} (3) задает силу связи между осцилляторами с номерами, i и j и рассчитывается как модуль отношения произведения ЭДС, связанных между собой генераторов E_i, E_j и величины комплексной проводимости Y_{ij} связанных узлов. Параметр γ_{ij} (4) характеризует фазовый сдвиг в цепи связи потребителей сети. Матрица \mathbf{Y}

³ T. Nishikawa, A. Motter. Comparative analysis of existing models for power-grid synchronization // New Journal of Physics., 2015, Vol. 17, P. 15012.

участвует в расчете параметров $A_i K_{ij} \gamma_{ij}$ в правой части уравнения (1) и является матрицей проводимости элементов сети.

ЭДС генератора E_i относится к внутреннему узлу генератора и описывается уравнением:

$$|E_i^*| = \left(\frac{P_{g(active),i}^* x_i'}{|V_i^*|} \right)^2 + |V_i^*|^2 + \left(\frac{P_{g(reactive),i}^* x_i'}{|V_i^*|} \right)^2, \quad (6)$$

где звездочкой обозначены комплексно-сопряженные величины $|E_i^*|$, $P_{g(active),i}^*$, $P_{g(reactive),i}^*$, $|V_i^*|$. $P_{g(reactive),i}^*$ отвечают за вырабатываемую активную и реактивную мощность генератора x_i' является паразитной индуктивностью, обусловленной конструктивной особенностью электрогенераторов. $|V_i^*|$ является напряжением выходного узла генератора и связанным с ЭДС генератора $|E_i^*|$ через индуктивность x_i' .

Для численного исследования энергосети используем следующие исходные параметры узлов 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	изменяется в ходе эксперимента	изменяется в ходе эксперимента	1.04	314.15 рад/с	200	0	1.04

Таблица 1. Исходные параметры узлов энергосети.

В таблице 1 представлены нормированные характеристики узлов генераторов и потребителей исходной энергосети. В численном исследовании параметры энергосети x_i' , H_i , D_i , $V_{g,i}$, $V_{c,i}$, ω_R являются фиксированными и не будут изменяться в процессе эксперимента. Необходимые для уравнения (8) расчет комплексной матрицы проводимости Y и внутренней ЭДС генератора E_i , производится с помощью данных, представленных в таблицах 1,2. Табличные данные линий передач, характеристик генераторов и потребителей

являются исходными данными программного комплекса «MATPOWER»⁴ в котором создается исходная комплексная матрица проводимости Y , а также матрица внутренней ЭДС E .

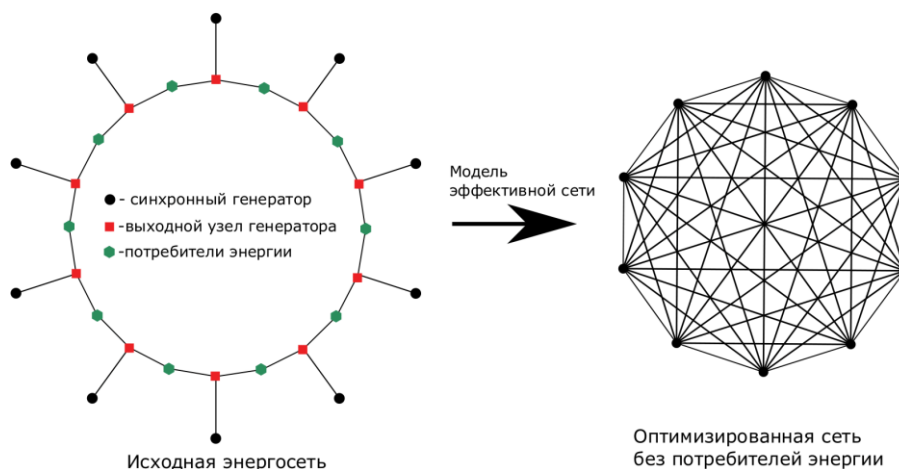


Рисунок 1. Исходная сеть с кольцевой топологией и её конечный преобразованный вид

На рисунке 1 представлена топология исследуемой исходной энергосети, которая состоит из 10 генераторов, 10 выходных узлов и 10 потребителей сети, объединенных в кольцевую топологию сети. Таким образом, общее количество узлов исходной сети составляет $N = 30$. Как показано на рисунке 1 конечная измененная энергосеть состоит исключительно из глобально связанных внутренних узлов генераторов ($n_g = 10, n_g \in N$) которые описываются уравнением (1). Рассчитанные параметры правых частей уравнения для конечной исследуемой энергосети имеют следующие размерности: $A (1 \times n_g)$, $K (n_g \times n_g)$, $\gamma (n_g \times n_g)$.

Представлены три карты режимов, полученные при трех значениях реактивной мощности генераторов, при 0, 1 и -1. Каждая карта режимов

⁴Zimmerman Ray, Murillo-Sanchez Carlos, Thomas Robert. MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education // IEEE Transactions on Power Systems. — 2011. — Vol. 26. — Pp. 12–19.

$$Pg_{active,i=2} + \sigma Pg_{active,i\xi},$$

строилась при изменении параметра инерционности всех осцилляторов и изменении величины дисперсии активной мощности генераторов. Инерция изменялась от 1 до 10, дисперсия изменялась от 0 до 50. Активная мощность генераторов изменялась по формуле:

где центральное значение всех мощностей генераторов равнялось 2.

Все полученные карты режимов были построены при 15 наборах случайных начальных условиях. Случайные начальные условия изменялись в представленных диапазонах:

$$\delta \in [-\pi; \pi] \text{ рад. и } \dot{\delta} \in [-100; 100] \text{ рад/с.}$$

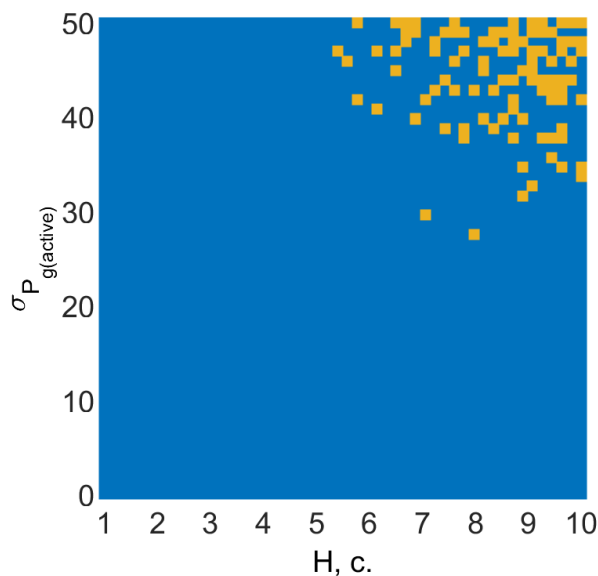


Рисунок 2. Карта режимов, полученная при изменении инерции генераторов и случайном разбросе активной мощности генераторов (реактивная мощность всех генераторов). По оси X показано значение инерции генераторов. Оно изменяется у всех генераторов одинаково. По оси Y представлена величина дисперсии активной мощности генераторов.

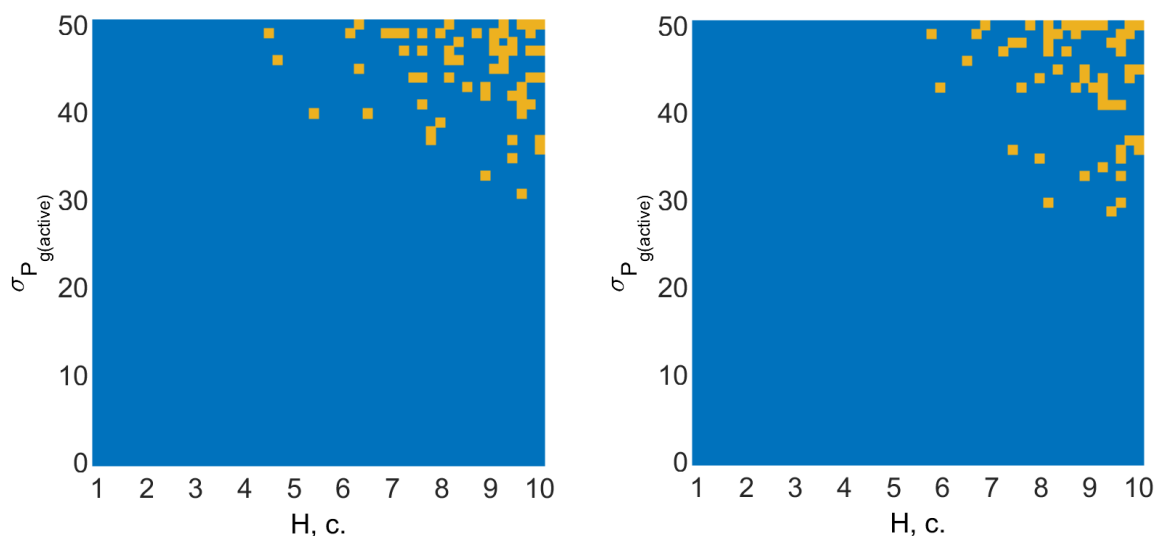


Рисунок 3 Карта режимов, полученная при изменении инерции генераторов и случайном разбросе активной мощности генераторов $P_{g(active,i)}$ (реактивная мощность всех генераторов $P_{g(reactive,i)} = 1$) $P_{g(reactive,i)} = -1$). По оси X показано значение инерции генераторов. Оно изменяется у всех генераторов одинаково. По оси Y представлена величина дисперсии активной мощности генераторов.

На рисунках 2 и 3 синим цветом обозначен режим фазовой синхронизации, где частота всех осцилляторов (генераторов) с течением времени одинакова. Желтым показана область сосуществования синхронной и асинхронной динамики, то есть при одних начальных условиях возможна фазовая синхронизация, при других начальных условиях хотя бы один осциллятор не синхронен, его частота плавает или не соответствует частоте других осцилляторов. Такой режим будет называться асинхронным. Появление региона с двумя типами динамик происходит при значении дисперсии случайной величины разброса $\sigma_{P_{g(active,i)}} \geq 25$ и значении инерции

в
с
е
х
о

мощности генераторов с положительным знаком появление области существования двух типов динамик наблюдалось при $N \geq 4,8$, а в случае

Стоит отметить, что режим фазовой синхронизации осцилляторов (рисунок 2,3) может наблюдаться как в синей зоне карты режимов, так и в желтой. В синей области этот режим наблюдается при всех начальных условиях, в желтой только при некоторых начальных условиях.

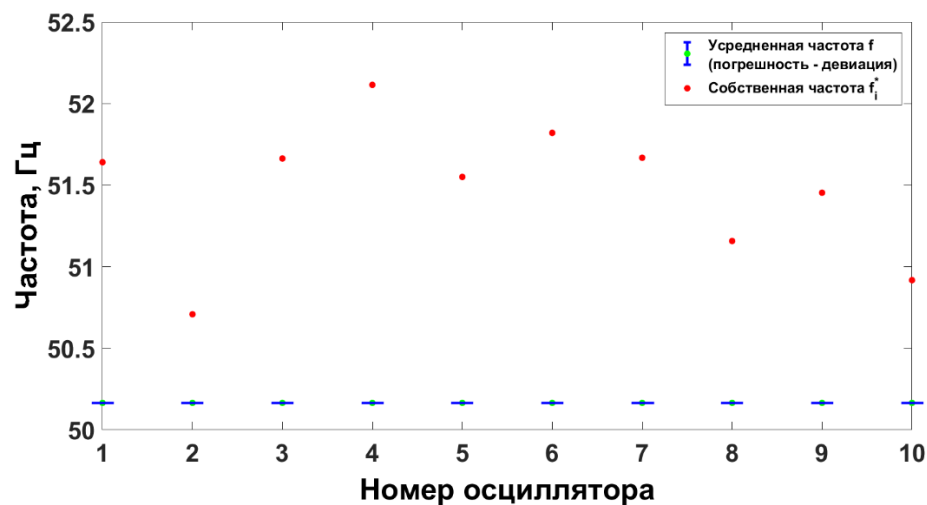
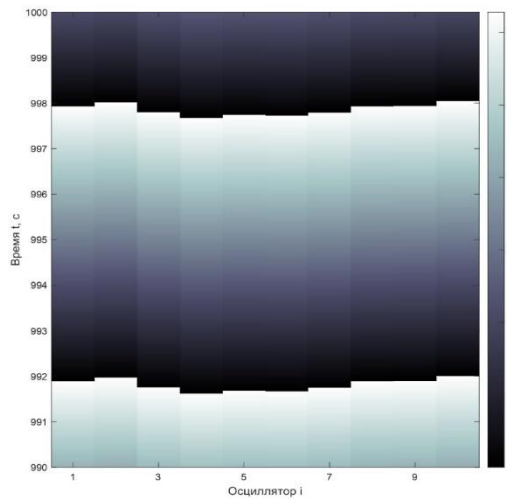
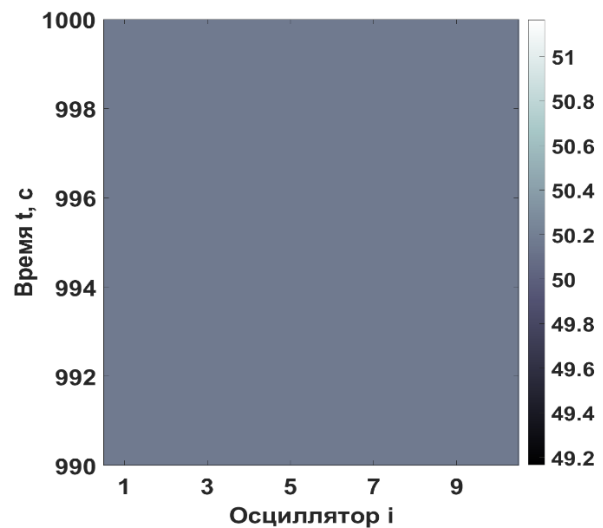


Рисунок 4. Диаграмма собственных частот и усредненных по времени мгновенных частот осцилляторов для режима фазовой синхронизации.

Рисунок 4 является диаграммой собственных (красные точки) и усредненных мгновенных частот осцилляторов (синие точки). Точка $\sigma_{Pg(active,i)} = 50$, $N = 10$. Рисунок 4 демонстрирует усредненные мгновенные частоты осцилляторов $\langle f \rangle_t$ (синие точки) и собственные частоты осцилляторов (красная точка), рассчитанные по формуле $f_i^* = \frac{\omega_R}{2\pi} \left(1 + \frac{A_i}{D}\right)$.



(a)



(б)

Рисунок 5. Пространственно-временная диаграмма мгновенных фаз и частот осцилляторов, подтверждающая наличие фазовой синхронизации и незначительной разности фаз.

На рисунке 5 представлены пространственно-временные диаграммы мгновенных фаз (рисунок 5 (а)) и частот осцилляторов (рисунок 5 (б)). По горизонтальной оси диаграмм представлены номера осцилляторов, по вертикальной оси время счета модели. Цветом на диаграммах показаны значения переменных мгновенных фаз (рисунок 5 (а)) и мгновенных частот (рисунок 5 (б)). Диаграмма 5(а) подтверждает наличие фазовой синхронизации ансамбля осцилляторов (все частоты осцилляторов идентичны), тогда как на рисунке 5(б) наглядно представлена незначительная разность мгновенных фаз между осцилляторами.

Асинхронный режим может наблюдаться только в желтой области представленных карт режимов (рисунок 2,3) и при определенных случайных начальных условиях. Также стоит отметить, что на рассмотренных картах режимов (рисунок 2,3) отсутствует область, в которой при всех рассмотренных начальных условиях наблюдалась исключительно асинхронная динамика осцилляторов.

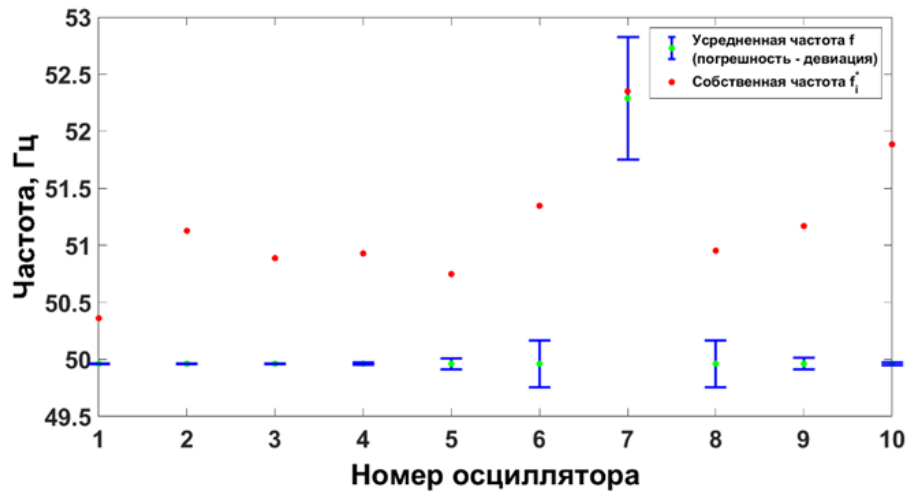


Рисунок 6. Диаграмма собственных частот и усредненных по времени мгновенных частот осцилляторов для асинхронного режима.

На рисунке 6, в сравнении с рисунком 4, происходит срыв мгновенной частоты у одного из осцилляторов. Как можно увидеть это осциллятор под номером $i = 7$. Как видно из рисунка 6 остальной кластер осцилляторов продолжает работу на опорной частоте сети.

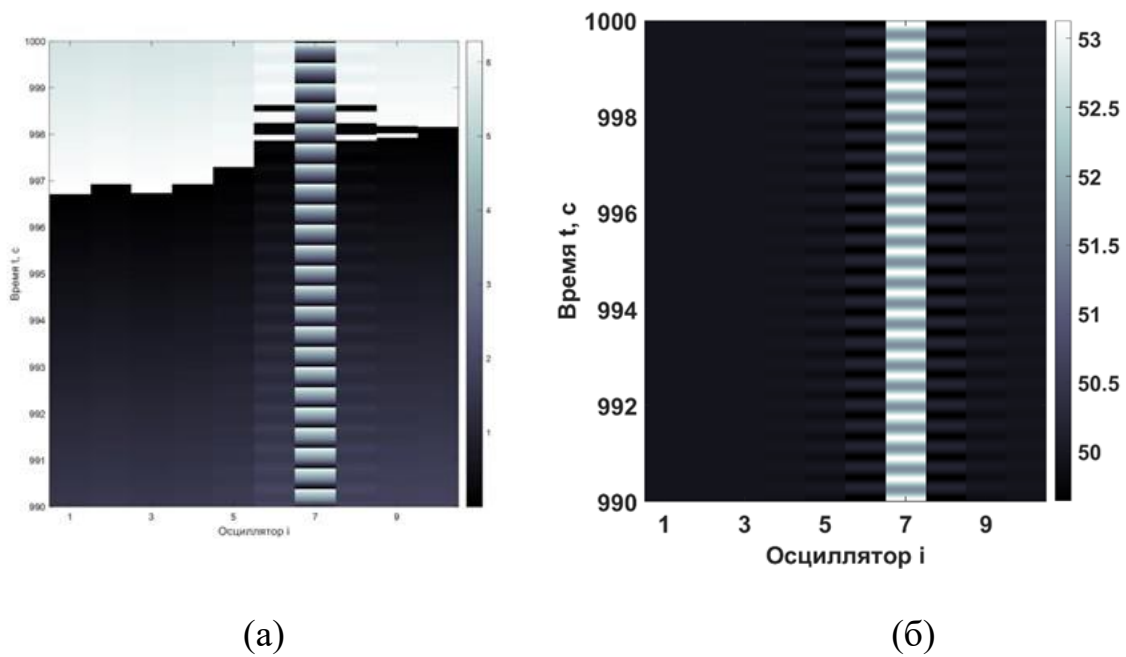


Рисунок 7. Пространственно-временная диаграмма мгновенных фаз и частот осцилляторов, подтверждающая наличие разности мгновенных фаз и частот между осцилляторами в когерентном кластере.

Как можно заметить на пространственно-временной диаграмме мгновенных фаз (рисунок 7(а)), устойчивый кластер осцилляторов имеет разность мгновенных фаз между осцилляторами, тогда как мгновенная фаза осциллятора с индексом $i = 7$ быстро изменяется на всем промежутке времени. На пространственно-временной диаграмме мгновенных частот (рисунок 7(б)), видно, что мгновенная частота осциллятора под номером $i = 7$ отлична от остального кластера осцилляторов, усредненное значение мгновенной частоты из рисунка 6 составляет $\langle f_4 \rangle = 52,2$ Гц. Также из рисунка 6 можно установить, что осциллятор $i = 7$ имеет большую девиацию мгновенной частоты.

Воспользовавшись другим набором случайных величин распределения активных мощностей, наблюдаем свойство мультстабильности ансамбля фазовых осцилляторов на примере асинхронного режима.

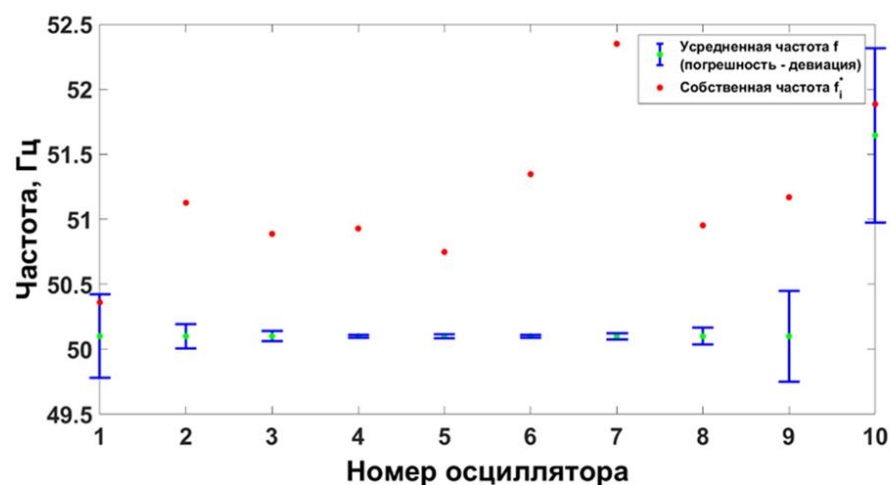


Рисунок 8. Диаграмма собственных частот и усредненных по времени мгновенных частот осцилляторов для асинхронного режима.

На рисунке 8 наблюдается срыв синхронизма в осцилляторе под номером $i = 10$, тогда как остальной кластер осцилляторов продолжает работу

на опорной частоте сети ω_R . Сравнивая полученные результаты на рисунке 6, мы можем наблюдать мультистабильность ансамбля фазовых осцилляторов. При фиксированных параметрах системы и различных начальных условиях мы можем наблюдать потерю синхронизма на разных номерах осцилляторов. В нашем случае мы наблюдали асинхронное поведение под номерами $i = 7$ и $i = 10$. Также на диаграммах 6 и 8 можно установить, что в случае потери синхронизма усредненная мгновенная стремится к значению своей собственной частоты.

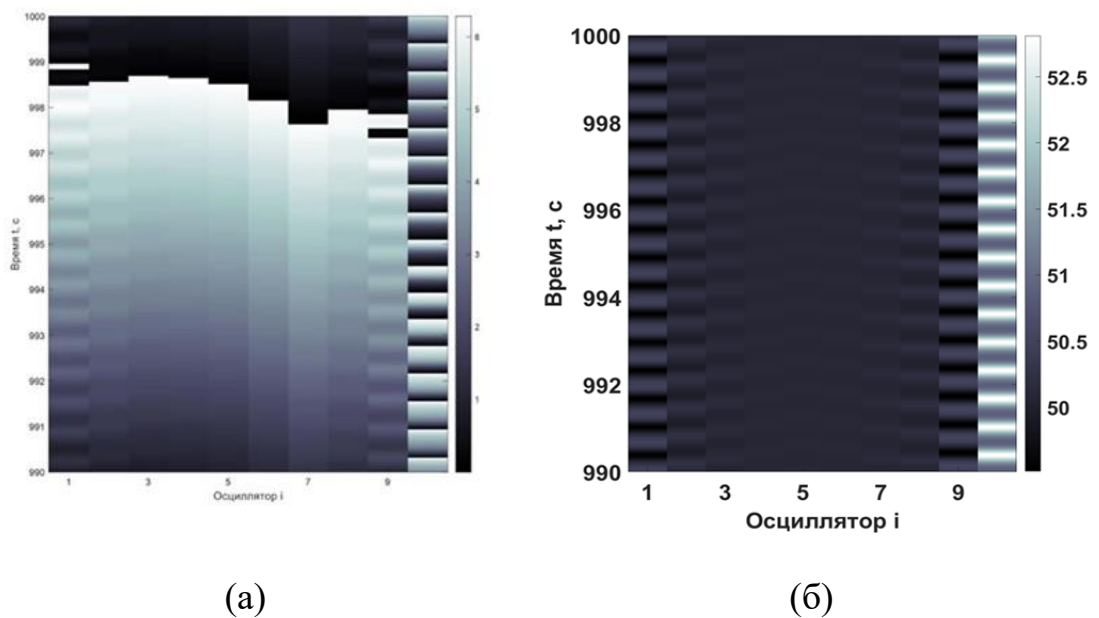


Рисунок 9. Пространственно-временная диаграмма мгновенных фаз и частот осцилляторов, подтверждающая наличие разности мгновенных фаз и частот между осцилляторами в когерентном кластере.

На пространственно-временной диаграмме мгновенных фаз (рисунок 9(а)), можно наблюдать разность мгновенных фаз между осцилляторами в когерентном кластере. В осцилляторах расположенных рядом с неустойчивым наблюдается непостоянство разности фаз, так как мгновенные частоты этих осцилляторов подвержены изменению во времени (смотреть девиацию

мгновенной частоты на рисунке 8). На пространственно-временной диаграмме мгновенных частот (рисунок 9(б)), видно, что мгновенная частота осциллятора под номером $i = 10$ отлична от остального кластера осцилляторов, усредненное значение мгновенной частоты из рисунка 8 составляет $\langle f_{10} \rangle = 51,75$ Гц. Также из рисунка 8 можно установить, что осциллятор $i = 10$ имеет большую девиацию мгновенной частоты, а мгновенные частоты осцилляторов под номерами $i = 9, 11$ изменяются во времени с девиацией $\pm 0,5$ Гц относительно своего усредненного по времени значения.

Заключение. В данной работе была рассмотрена идеализированная и упрощенная модель энергосети в виде ансамбля фазовых осцилляторов второго порядка.

В качестве численного эксперимента в работе производится построение карты режимов ансамбля фазовых осцилляторов. Карты режимов были построены при изменении дисперсии случайного разброса активной мощности генераторов и параметра инерции, изменяемого во всех генераторах. На плоскости управляющих параметров выделены две области, соответствующие двум режимам работы сети: синхронный режим и режим сосуществования синхронного и асинхронного поведения ансамбля в зависимости выбора начальных условий.

В работе также представлена оценка полученных режимов путем построения: пространственно-временных диаграмм, диаграмм мгновенных усредненных частот и собственных частот осцилляторов, временных реализаций и графиков параметра порядка Курамото. Для случая асинхронного режима было показано явление мультистабильности системы на примере изменения случайных начальных условий модели при фиксированных значениях параметров $\sigma_{P_{g(active,i)}}$ и H .