

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 генераторов энергосети на
фазовую динамику осцилляторов с инерцией**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4032 группы
направления 03.03.03 Радиофизика
Института физики

Филиппова Артема Алексеевича

Профессор каф. Радиофизики
и нелинейной динамики

д.ф.-м.н., доцент

_____ А.В. Шабунин

Зав. кафедрой радиофизики
и нелинейной динамики

д.ф.-м.н., доцент

_____ Г.И. Стрелкова

Саратов 2024 г.

Введение

Сегодняшняя жизнь представляет собой постоянное использование электрической энергии. Производство этой энергии осуществляется с помощью генераторов энергосети. Явления синхронизации повсеместно присутствуют в областях физических, социальных, биологических и технологических исследований. Когда дело доходит до исследования энергосистемы в технологическом аспекте, реализация синхронизации также является важным условием устойчивой и безопасной работы. Наряду с быстрым развитием современных энергосистем, интеграция в высшей степени случайных и распределенных возобновляемых источников энергии приводит к угрозе более сложных и частых сбоев в работе энергосистемы и управлении, что создает новые проблемы для поддержания требований к синхронизации и устойчивости. Эти возмущения могут привести к отключениям электроэнергии и каскадным сбоям, при которых в худшем случае произойдет полное катастрофическое нарушение синхронизации.

Влияние неоднородной мощности генераторов энергосети на фазовую динамику осцилляторов с инерцией зависит от нескольких факторов. Во-первых, изменение мощности генераторов может привести к изменению баланса мощностей между генерируемой и потребляемой энергией. Во-вторых, изменение мощности генераторов способствует изменению собственной частоты фазового осциллятора. Это, в свою очередь, может привести к изменению фазовой динамики всего рассматриваемого ансамбля осцилляторов. К тому же, изменение мощности генераторов может иметь ограничения и зависеть от пропускной способности линии передач энергосети, которая в свою очередь может привести к нарушению стабильности энергосистемы.

Таким образом, изменение мощности генераторов энергосети может существенно воздействовать на стабильность энергосетей. Для исследования этих влияний необходимо проанализировать простую модель энергосети с помощью моделирования уравнений фазовой динамики таких как ансамбль

фазовых осцилляторов с инерцией. 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 потребителей. 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 случае различной асинхронной динамики энергосети.

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

В работе поставлены следующие задачи:

1. Изучить как неоднородность мощности генераторов энергосети влияет на фазовую динамику осцилляторов с инерцией.
2. Выяснить какие параметры могут влиять на фазовую динамику осциллятора при неоднородности мощности генераторов энергосети.

Для решения данных задач будут проведены исследования ансамбля фазовых осцилляторов с инерцией и проведен анализ полученных данных.

Работа состоит из следующих основных разделов

1. Исследуемая модель
2. Влияние неоднородной активной мощности генераторов энергосети:
 - Построение карты режимов
 - Режим фазовой синхронизации осцилляторов
 - Режим асинхронного поведения осцилляторов
3. Карта фазовой когерентности

Основное содержание работы

Исследуемая модель

Существующие в повседневной жизни энергосети состоят из множества объектов, среди которых особое внимание уделяется генерирующей части энергосети. Одним из распространенных элементов генерирующей части выступает синхронный генератор энергии. В упрощенном виде синхронные генераторы можно представить в виде подвижной части «ротора» и неподвижной части «статора» .

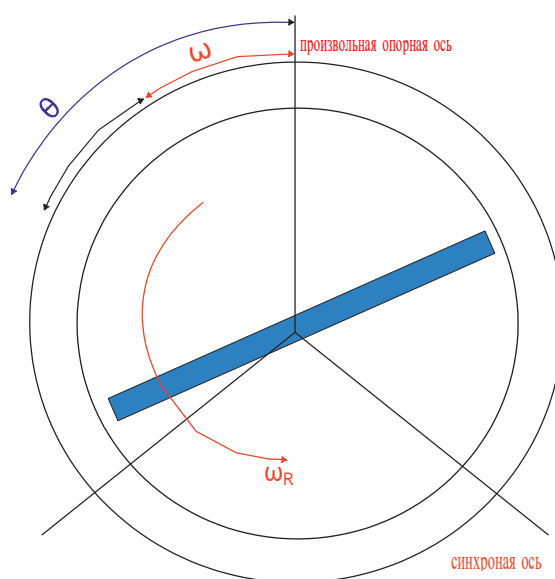


Рисунок 1. Ротор

Параметры движения ротора генератора

Одной из моделей энергосети, в которой применяются роторы в модифицированном виде, является математическая модель взаимодействующих синхронных машин. Особенностью модели является исследование коллективной динамики синхронных машин без учета изменяемой динамики потребителей. В данной модели исходная сеть элементов энергосети претерпевает изменение. Элементы исходной энергосети, связанные с потреблением или активными потерями мощности, сокращаются. Оставшиеся элементы связанные с генерацией энергии формируют конечную сеть

элементов. Именно такая конфигурация сети выступает в качестве модели взаимодействия синхронных машин.

В исследуемой модели генераторы представлены в виде ансамбля связанных ротаторов (рисунок 1), которые описываются следующими уравнениями:

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

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

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

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

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

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,

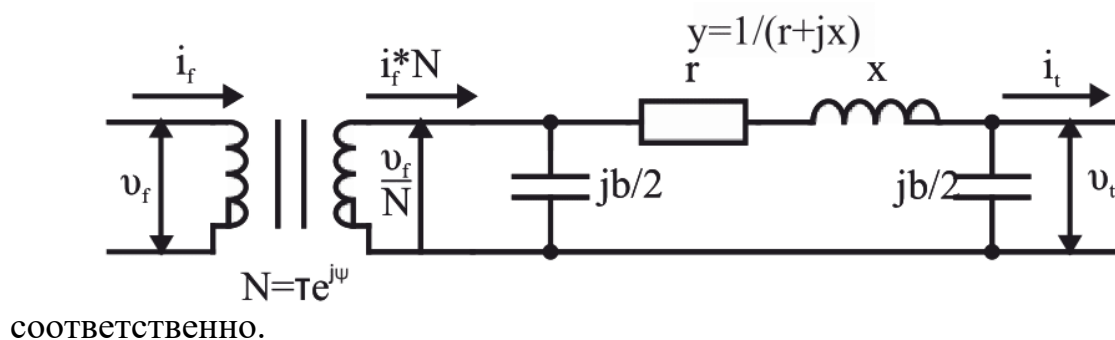


Рисунок 2. Линия передач, представленная в виде π -модели

На рисунке 2 представлена линия передач, используемая между узлами энергосети. Данный тип линии передач переменного тока, моделируются с

помощью общей модели цепи линии передачи (π -модели), которая включает в себя последовательный импеданс $z_s = r_s + jx_s$ где $j = \sqrt{-1}$, $s = 1 \dots N_s$ — номер линии связи и величину проводимости b_s с последовательно включенным идеальным трансформатором

В работе применяется топология исследуемой исходной энергосети, которая состоит из 100 генераторов, 100 выходных узлов и 100 потребителей сети, объединенных в кольцевую топологию сети. Таким образом, общее количество узлов исходной сети составляет $N = 300$.

Влияние неоднородной активной мощности генераторов энергосети

Рассмотрим режим работы энергосети в случае неоднородной активной мощности генераторов. Для решения поставленных задач произведем построение различных карт режимов в зависимости от управляющих параметров. Каждая карта режимов строилась при изменении параметра инерционности всех осцилляторов и изменении величины дисперсии активной мощности генераторов. Инерция H изменялась от 1 до 10, дисперсия $\sigma_{P_{g(active,i)}}$ изменялась от 0 до 50.

.

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

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

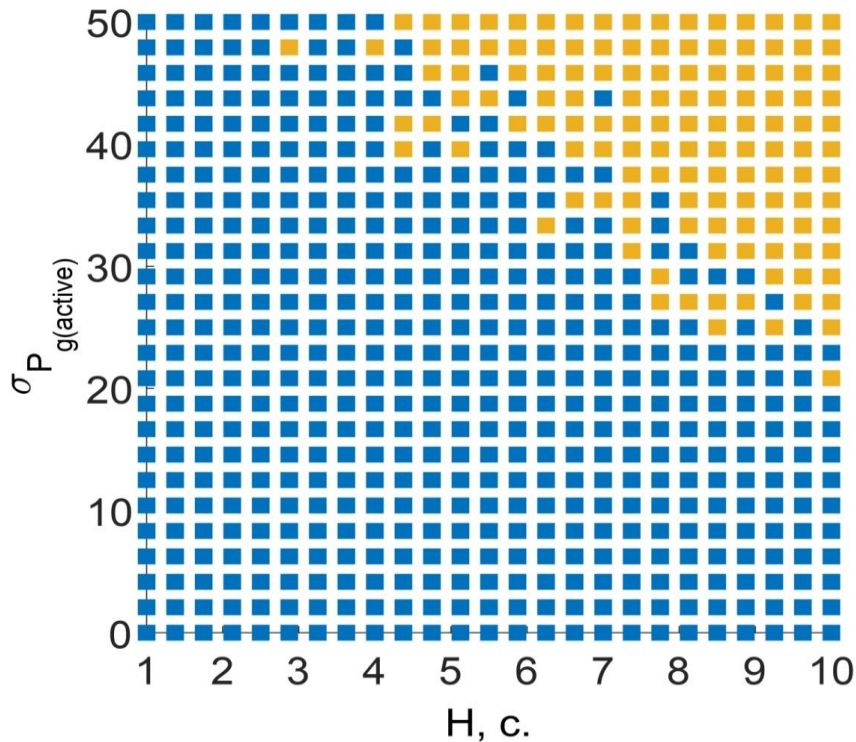


Рисунок 3. Карта режимов, полученная при изменении инерции генераторов и случайном разбросе активной мощности генераторов $P_{g(active,i)}$ (реактивная мощность всех генераторов $P_{g(reactive,i)} = 0$)

Синим цветом на карте режимов (рисунок 3) обозначен режим фазовой синхронизации, где частота всех осцилляторов (генераторов) с течением времени одинакова, а фазы связанных осцилляторов имеют постоянную разность между собой. 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 изменяется во времени или не соответствует частоте других осцилляторов. Такой режим будет называться асинхронным.

Режим фазовой синхронизации осцилляторов

Необходимо сказать, что режим фазовой синхронизации осцилляторов 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. Рассмотрим случай синхронного поведения осцилляторов.

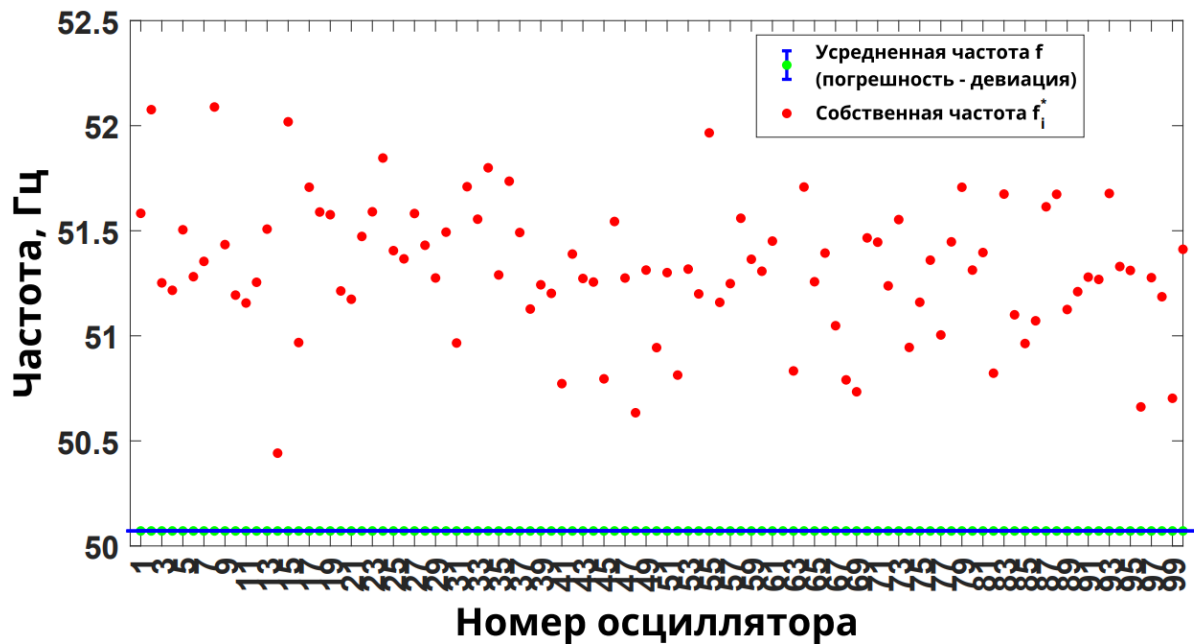


Рисунок 4. Диаграмма собственных частот и усредненных по времени мгновенных частот осцилляторов для режима фазовой синхронизации

По рисунку 4 можно сказать, что, повышение активной мощности генератора влечет за собой повышение собственной частоты осциллятора и наоборот понижение активной мощности генератора уменьшает собственную частоту осциллятора.

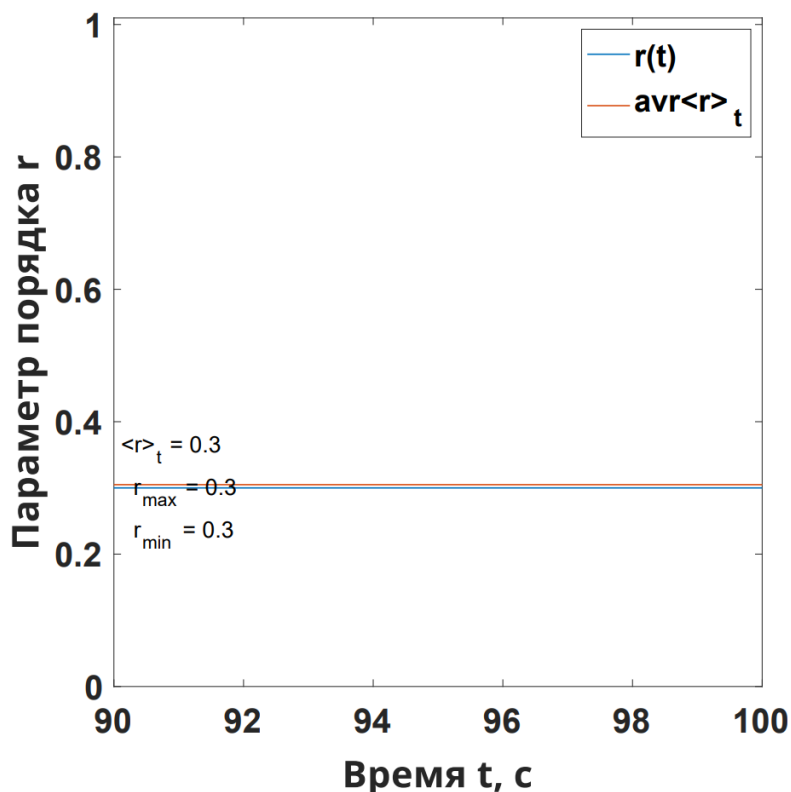


Рисунок 5. Зависимость величины параметра порядка Курамото r фазовых осцилляторов, мгновенное значение r по времени синяя линия, усредненное по времени значение $\langle r \rangle_t$ красная линия

. Параметр r представляет фазовую когерентность совокупности осцилляторов, которая рассчитывается как:

$$r e^{i\chi} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j} \quad (6)$$

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

Рисунок 5 показывает, насколько фазы всех осцилляторов совпадают, то есть являются идентичными. В нашем случае параметр Курамото равен $r = 0.3$, это обозначает, что несмотря на то, что осцилляторы все синхронны, (переменная частоты во всех осцилляторов одинакова и не изменяется во времени) между ними имеется значительная разность фаз между

осцилляторами и эта разность не изменяется, так как не изменяется переменная частоты.

Представленный режим фазовой синхронизации может проявляться как в синей зоне карты режимов (рисунок 4), так и в желтой. В синей зоне этот режим наблюдается при всех случайных начальных условиях, в желтой - только при некоторых случайных начальных условиях. Это связано с тем, что с ростом параметра инерции и неоднородности собственных частот осцилляторов в ансамбле фазовых осцилляторов наблюдается сильная мультистабильность между множеством различных состояний равновесий.

Режим асинхронного поведения осцилляторов

Асинхронный режим может наблюдаться только в желтой области представленной карте режимов и при определенных случайных начальных условиях. Также стоит отметить, что на рассмотренной карте режимов отсутствует область, в которой при всех рассмотренных начальных условиях наблюдалась исключительно асинхронная динамика осцилляторов.

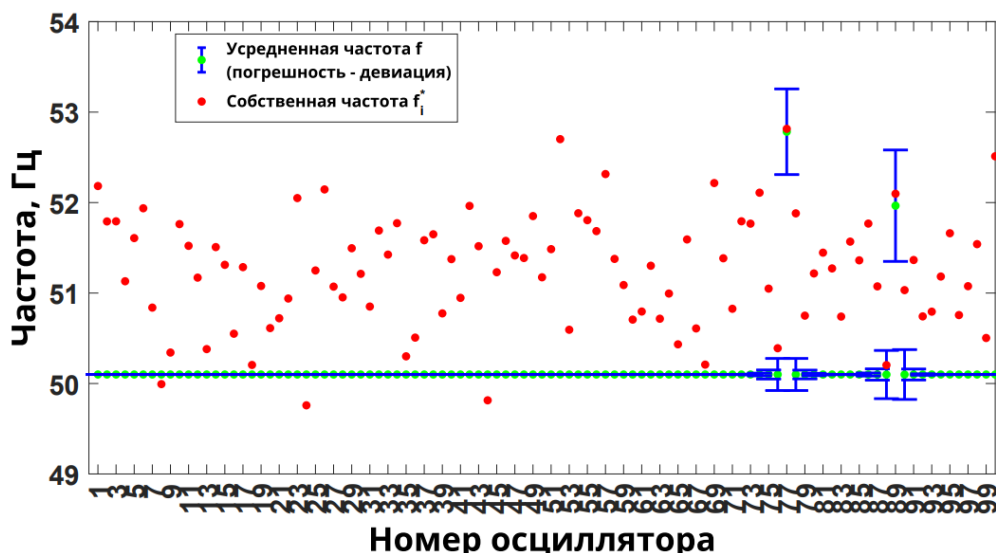


Рисунок 6. Диаграмма собственных частот и усредненных по времени мгновенных частот осцилляторов для асинхронного режима.

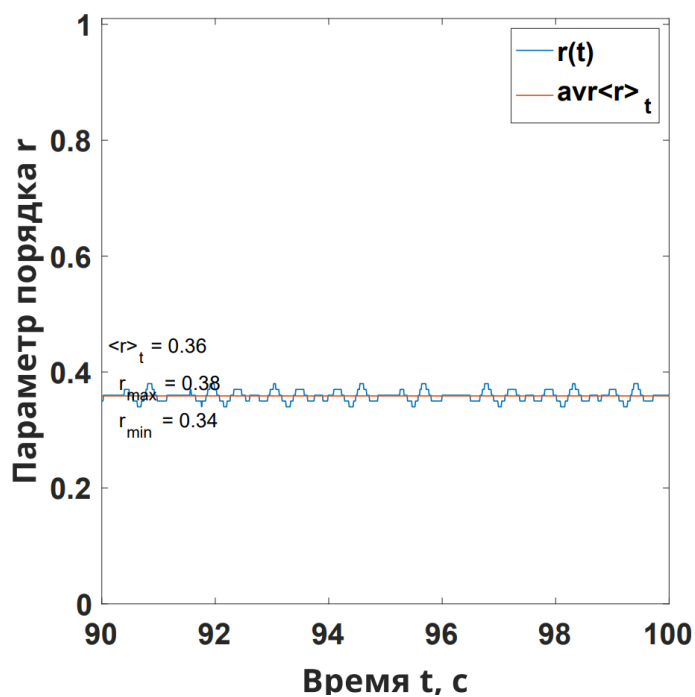


Рисунок 7. Зависимость величины параметра порядка Курамото r фазовых осцилляторов, мгновенное значение r по времени синяя линия, усредненное по времени значение $\langle r \rangle_t$ оранжевая линия

На рисунке 7, параметр порядка r изменяется во времени в пределах $0.34 \leq r \leq 0.38$ на промежутке всего времени счета. Усредненная величина уровня фазовой когерентности составляет $\langle r \rangle_t = 0.36$.

Карта фазовой когерентности

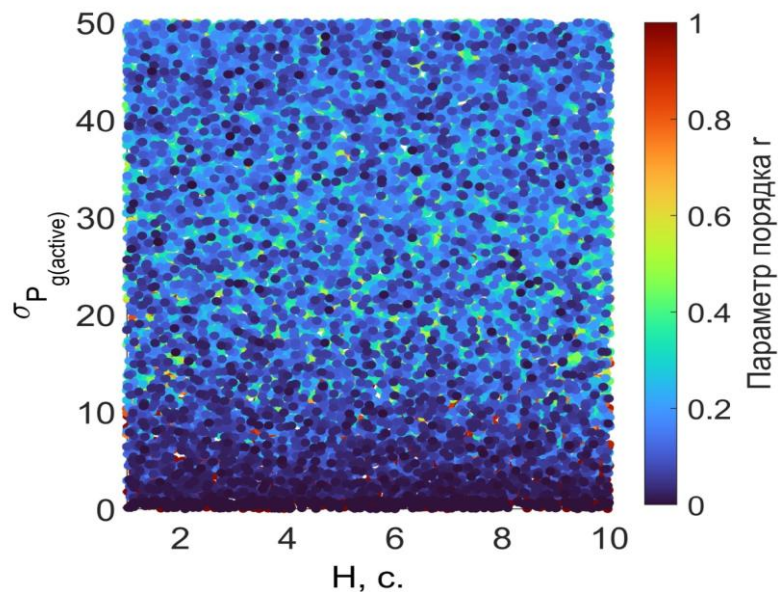


Рисунок 8. Карта фазовой когерентности (вид сверху). Каждая точка является рассчитанным усредненным по времени параметром порядка Курамото.

На рисунке 8, карта режимов также построена при изменении дисперсии случайной величины активной мощности и параметра инерции всех генераторов. По оси X показано значение инерции генераторов. Оно изменяется у всех генераторов одинаково. По оси Y представлена величина дисперсии активной мощности генераторов. Её значение является степенью дисперсии активной мощности генераторов относительно своей средней величины, за среднее значение была взята величина активной мощности равной 2 безразмерным единицам. Также эта карта была построена при отсутствии реактивной мощности генераторов и при множестве случайных начальных условий.

Можно сказать, что при изменении дисперсии разброса активной мощности параметр Курамото занимает отличные от 0 и 1 значения и при значении

дисперсии разброса равной $\sigma_{P_{g(active,i)}} = 10$ мы можем наблюдать большое разнообразие значений параметра r . С ростом разброса дисперсии мощности, фазовая синхронизация (параметр Курамото равный 1) наблюдается реже.

Главным недостатком карты режимов фазового параметра порядка Курамото является то, что, значения r являются усредненными по времени и не позволяют оценить частотную синхронизацию.

Заключение

В данной работе была рассмотрена идеализированная и упрощенная модель энергосети в виде ансамбля фазовых осцилляторов второго порядка. Упрощение энергосети заключалось в исключении рассматриваемой динамики потребителей энергосети, за счет представления потребителя как некоего постоянного импеданса заключенного между взаимодействующими генераторами. В качестве исходной энергосети было рассмотрено кольцо из 100 элементов. Редуцирование потребителей позволило сократить количество рассматриваемых элементов и перейти к глобально связанную топологию сети. Таким образом оставшиеся элементы принадлежат к генераторам энергосети заключенным в глобально связанную сеть.

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. Появление региона с двумя типами динамик происходит при значении дисперсии случайной величины разброса $\sigma_{P_{g(active,i)}} \geq 25$ и значении инерции всех осцилляторов $H \geq 5$.