

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

**Исследование влияния нелинейной диссипации на синхронизацию
энергосетей**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 241 группы

направления 03.04.03 «Радиофизика»

физического факультета

Злобина Дмитрия Васильевича

Научный руководитель

Аспирант

П.А. Аринушкин

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

В.С. Анищенко

Саратов 2020

1. Введение

Стабильное и надежное электроснабжение является неотъемлемой составляющей процветания современного общества. С развитием человечества необходимость в электроэнергии стремительно растет. Распространенные источники электроэнергии базируются на невозобновляемых ресурсах земли, таким образом, в будущем возникает вероятность появления энергетического кризиса. Именно поэтому, на сегодняшний день приоритетом в энергетической сфере является разработка и производство альтернативных источников энергии. Интеграция альтернативной энергии в уже существующую сеть также вызывает проблемы, связанные со стабильной работой энергосети. Таким образом, проблемы в области электроэнергии являются актуальными на сегодняшний день. Устойчивость источников энергии вызывает интерес у ученых, которые занимаются исследованием проблем энергосетей. При большом разнообразии мощностей источников энергии происходит неравномерное распределение генерируемой энергии в сети. Это связано с малой величиной выходной мощности генераторов возобновляемой энергии по отношению к не возобновляемым источникам.

Основными критериями исследования энергосетей являются нахождение устойчивых состояний работы электродвигателей и частотная синхронизация всех генераторов сети. Источники энергии любого типа, включенные в глобальную сеть генерации и потребления, должны генерировать энергию на базовой частоте работы сети и функционировать в допустимых частотных пределах для поддержания полного синхронизма сети. При рассмотрении коротких участков времени потребляемая мощность является величиной не постоянной, быстро изменяющейся во времени. Таким образом, генераторы должны обладать устойчивостью на коротких участках времени работы и иметь систему контроля допустимых отклонений частоты вращения ротора генератора. В большинстве своем реальные энергосети не являются однородными, то есть имеют участки сети, в которых имеется переизбыток или недостаток вырабатываемой энергии. Поскольку линии электропередач

необходимо прокладывать в разных географических регионах, например в небольших деревнях в горах или в густонаселенных городских районах, их пропускная способность сильно варьируется. Это вызывает неоднородность в пропускной способности линий. В оптимальном случае энергосистема работает в так называемом стационарном состоянии, иными словами, все генераторы и потребители работают на опорной частоте сети. Кроме того, все напряжения должны быть постоянными. Способность энергосистемы возвращаться в устойчивое состояние после возмущения зависит от свойств сети, а также от характера возмущения.

Целью магистерской работы является исследование влияния нелинейной диссипации на синхронизацию энергосетей

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие основные задачи:

1. Исследование численных моделей энергосетей.
2. Исследование влияния нелинейной диссипации в модели эффективной энергосети и модели с сохранением топологии энергосети.

Во введении обосновывается актуальность исследования влияния нелинейной диссипации на синхронизацию энергосетей

Приводится краткий анализ литературных источников, касающихся основных экспериментальных и теоретических исследований. Формулируется цель работы, перечисляются основные задачи, решаемые в ходе работы.

Глава 2 посвящена способу представления электросетей в виде топологии с использованием теории графов. Описываются линии передачи, генераторы и потребители. Рассматривается устройство и назначение синхронной машины,

Глава 3 посвящена рассмотрению модели электрической сети, параметры которых определяются параметрами и характеристиками физической сети под влиянием нелинейной диссипации. Приводятся уравнения формирующие исследуемую модель. Приводятся основные параметры структуры. Строятся пространственно-временные диаграммы фазовых скоростей осцилляторов,

приводятся результаты численного решения в виде карт режимов. Приводятся результаты исследования влияния диссипации на области на карте режимов

Глава 4 посвящена исследованию влияния нелинейной диссипации на модель с сохранением топологии энергосети. Описывается исследуемая модель, приводятся уравнения формирующие модель. Строятся пространственно-временные диаграммы фазовых скоростей осцилляторов и графики собственных и усредненных по времени частот осцилляторов энергосети.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

2. Моделирование и устройство электросетей

Распространенным способом изучения электросетей является описание их в виде топологии с использованием теории графов. Генераторы энергии, которыми обычно являются электростанции и потребители, например, города или промышленные районы, являются узлами сети. Они связаны ребрами, которые являются линиями. Узлы сети представляют собой синхронные машины.

Линии электропередачи — это в основном провода, соединяющие электростанции, потребителей и станции преобразования. Одним из способов математического описания линии передач является представление линии передач в виде импеданса. Представление линий передачи в виде отрезка сети, содержащий активные и реактивные элементы сопротивления. Трансформатор, который называется отводным трансформатором с отношением отводов τ , соединен последовательно с импедансом Z , содержащий активное сопротивление и реактивное сопротивление индуктивного характера. Также два конденсатора соединены параллельно импедансу Z , который называется “емкость линии”. Модель не включает в себя трансформатор, но учитывает емкостные характеристики проводников, а также импеданс [1] Z .

Генераторы в электросетях всегда реализуются как синхронные машины, которые являются выгодными, поскольку после достижения синхронизации они работают с той же частотой, что и сеть. Это гарантирует максимально

возможную передачу мощности. Функциональность синхронной машины, можно использовать в качестве генератора или двигателя.

3. Синхронизация цепочки осцилляторов в модели эффективной сети

3.1. Численная модель эффективной сети

Для математического описания сети мы используем эффективную модель сети [2], Математическая модель эффективной модели энергосети выглядит следующим образом:

$$\frac{2H_i}{\omega_R} \ddot{\delta}_i + \frac{D_i}{\omega_R} \dot{\delta}_i = A_i^{\text{EN}} - \sum_{j=1, j \neq i}^{n_g} K_{ij}^{\text{EN}} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}^{\text{EN}}), \quad i = 1, \dots, n_g \quad (3.1)$$

$$A_i^{\text{EN}} = P_{g,i} - |E_i|^2 G_{ii}^{\text{EN}}, \quad K_{ij}^{\text{EN}} = |E_i E_j Y_{ij}^{\text{EN}}|, \quad \gamma_{ij}^{\text{EN}} = \alpha_{ij}^{\text{EN}} - \frac{\pi}{2}, \quad (3.2)$$

ω_R – опорная угловая частота, равна частоте физической сети, H_i – константа инерции, D_i – константа затухания, A_i – параметр собственных мощностей генератора. Параметр K_{ij} – представляет силу динамической связи между осцилляторами i и j или максимум взаимных мощностей генератора и приемной системы, γ_{ij} характеризует фазовый сдвиг. Все представленные параметры системы имеют безразмерный вид. Параметры правой части уравнения $A_i K_{ij}$, γ_{ij} определяются с помощью физических параметров реальной энергосети. Собственная мощность генератора A_i^{EN} находится как разность выходной мощности генератора $P_{g,i}$ и произведения ЭДС генератора на действительную часть матрицы адмиттанса сети G_{ii}^{EN} . K_{ij}^{EN} является динамической силой связи, которую можно интерпретировать как максимальную мощность передачи энергии между двумя элементами сети и вычислить как произведение матрицы адмиттанса Y_{ij}^{EN} и ЭДС элементов, участвующих в связи.

Динамика генераторов описывается системой уравнений связанных осцилляторов. В качестве физической сети мы исследуем идеализированную модель, в которой генераторы, потребители и линии передач имеют идентичный набор величин и характеристик.

Линия передач представлена в виде π -модели [4], где r – активное сопротивление, x и b индуктивное и емкостное реактивные сопротивления линии передач, параметр τ является коэффициентом трансформации напряжения. Суммарная мощность генератором равна суммарной мощности потребления. Влияние реактивной мощности не рассматривается, поэтому для каждого элемента сети это значение равно нулю. Сеть кольцевую топологию и состоит из 10 генераторов и 10 потребителей, генераторы в свою очередь соединены в кольцо через выходные узлы.

3.2. Влияние диссипации на синхронизацию цепочки осцилляторов в модели эффективной сети

Данная глава посвящена исследованию диссипации на поведение модели эффективной сети.

Рассмотрим, как ведет себя система уравнений (3.1, 3.2) в случае постоянной диссипации $D=50$. Построим карту режимов, изменяя характеристики десятого осциллятора, для нескольких величин параметров P_g и N_b в диапазоне $200 < P_g < 600$ и $1 < N_b < 10$ соответственно. Время интегрирования численной модели составляло $T = 100$ при шаге $h = 0.001$

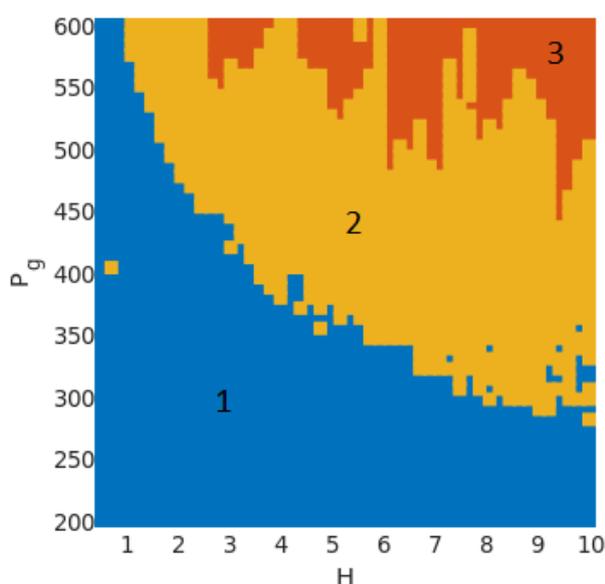


Рис.1. Карта режимов для коэффициента $D = 50$. 1 - зона устойчивого поведения генераторов, 2 - зона бистабильного поведения генераторов и 3 – неустойчивое поведение генераторов.

Рассмотрим области режимов динамической системы на примере рисунка 1. При малых значениях инерции энергосеть является более устойчивой к рассинхронизации. При малых значениях выходной мощности $P_g = 200-300\text{MVA}$ система находится в полной синхронизации при любых значениях коэффициента инерции. На средних величинах P_g и H доминирует область бистабильного поведения энергосети. При рассмотрении осцилляторов с величиной коэффициента инерции $H=7-10$ большая вариация мощности генераторов приводит к потере устойчивости осцилляторов, таким образом, в энергосети наблюдаются случаи срыва синхронизма энергосети и неустойчивая работа генераторов.

В режиме синхронизации все осцилляторы имеют одинаковые временные реализации, так как условиями данного режима являются постоянство во времени мгновенных величин фазовых скоростей и равенство этих значений во всех осцилляторах исследуемой системы. Параметр фазовой когерентности в данном случае $r=1$, система находится в режиме полной синхронизации в течении всего времени. Разность фаз в таком случае имеет постоянное значение.

Перейдем к рассмотрению несинхронного режима. Увеличение выходной мощности десятого осциллятора приводит его в неустойчивое состояние. Фазовая скорость в таком случае приобретает колебательный характер стационарный во времени. Фазовые скорости первого и пятого осциллятора под влиянием десятого осциллятора, имеют осцилляции с близкими значениями амплитуд. В несинхронном режиме фазовая когерентность изменяется во времени в пределе $0.78 \leq r \leq 0.98$ на промежутке всего времени счета. Фаза десятого осциллятора со временем нарастает, относительно других осцилляторов системы. Фазовая скорость десятого осциллятора так же отличается от остальной цепочки осцилляторов, но постоянна во времени.

3.3. Влияние нелинейной диссипации на синхронизацию цепочки осцилляторов в модели эффективной сети

Далее мы рассмотрим влияние нелинейной диссипации на модель эффективной сети. В системе уравнений (3.1, 3.2) мы произвели замену параметра диссипации D в нелинейную форму вида:

$$D = kd * |\delta(t)| + 50, (3.3)$$

где kd – коэффициент диссипации, $\delta(t)$ - мгновенное значение фазовой скорости осциллятора в момент времени t . Благодаря такой замене, для каждого осциллятора диссипация изменяется динамически в зависимости от величины его фазовой скорости.

Модель энергосети с сохранением топологии позволяет нам исследовать сеть с первоначальной топологией физической сети в отличии от модели эффективной энергосети, в которой происходит сокращение числа дифференциальных уравнений и упрощение топологии рассматриваемой сети. В ходе эксперимента мы изменяли выходную мощность P и коэффициент инерции H , одного из осцилляторов при разных коэффициентах диссипации kd . Диссипация изменялась одновременно во всех осцилляторах системы.

Исследование показало, что с увеличением коэффициента диссипации синхронная область занимает большую площадь карты режимов генераторов как по мощности, так и по диапазону коэффициентов инерции, позволяя генераторам работать в синхронном режиме при различных величинах выходной мощности и инерции системы. Карта режимов состоит из трех областей: синхронного, бистабильного и несинхронного режима.

В случае коэффициента инерции равном $H = 1$, энергосеть находится в режиме полной синхронизации на протяжении всего интервала изменяемой мощности. При малых значениях выходной мощности $P_g = 200-300MVA$ система находится в полной синхронизации. На средних величинах P_g и H доминирует область бистабильного поведения энергосети. При рассмотрении осцилляторов с величиной коэффициента инерции $H=7-10$ большая вариация мощности генераторов приводит к потере устойчивости осцилляторов, таким

образом, в энергосети наблюдаются случаи срыва синхронизма энергосети и неустойчивая работа генераторов.

При дальнейшем увеличении коэффициента k_d зона устойчивости еще больше расширяется как по диапазону мощностей, так и инерции. При значении $k_d=3$ появляется зона бистабильности осцилляторов при малых значениях выходной мощности $P_g = 250-270\text{MVA}$ и значении коэффициента инерции $H=4$. При значении выходной мощности $P_g = 270-450\text{MVA}$ система находится в полной синхронизации, при любых значениях коэффициента инерции.

При $k_d=4$ основная область синхронизации продолжает расширяться. Так же расширяется островок бистабильности в области $P_g = 200-250\text{MVA}$. Область полной синхронизации находится в диапазоне мощности $P_g = 250-470\text{MVA}$. На высоких мощностях и при больших коэффициентах инерции сохраняются неустойчивые режимы синхронизации, а так же полная потеря синхронизации.

Дальнейшее увеличение $k_d = 5$ так же увеличивает область синхронизации осцилляторов. Область полной потери синхронизации значительно снижается. Все больше бистабильность наблюдается в диапазоне выходных мощностей $P_g = 200-270\text{MVA}$ коэффициентов инерции $H=5-6$. При значениях выходной мощности $P_g = 270-500\text{MVA}$ цепочка осцилляторов синхронизирована во всем диапазоне коэффициента инерции H . Для коэффициента инерции от 1 до 5 синхронизация сети наступает для всего диапазона мощностей.

При рассмотрении $k_d = 6$ зона синхронизации еще больше расширяются, однако бистабильность появляется при малых и средних значениях выходной мощности $P_g = 200-350\text{MVA}$. В случае коэффициента инерции равном $H=1-4$, энергосеть находится в режиме полной синхронизации на протяжении всего интервала изменяемой мощности. При средних значениях выходной мощности $P_g=400-500\text{MVA}$ синхронизация наблюдается во всем диапазоне коэффициентов инерции.

4. Синхронизация цепочки осцилляторов в модели с сохранением топологии сети

4.1. Численная модель с сохранением топологии энергосети

Данная глава посвящена исследованию особенностей синхронизации осцилляторов в модели с сохранением топологии энергосети[5]. Как и в случае модели эффективной сети, мы используем энергосеть с кольцевой топологией, состоящей из 10 генераторов, 10 потребителей и 10 выходных терминалов. Таким образом общее число осцилляторов достигнет $N = 30$.

Основным отличием данной модели от модели эффективной сети [3] заключается в рассмотрении мощности потребителей как динамической величины, меняющуюся во времени.

Уравнение, описывающее динамику генераторов:

$$\frac{2H_i}{\omega_R} \ddot{\delta}_i + \frac{D_i}{\omega_R} \dot{\delta}_i = A_i^{SP} - K_{i,i+n_g}^{EN} \sin(\delta_i - \delta_{i+n_g}), \quad i = 1, \dots, n_g \quad (4.1)$$

$$A_i^{SP} = P_{g,i}^*, \quad K_{i,i+n_g}^{SP} = \left| \frac{E_i^* V_i^*}{x'_{d,i}} \right|, \quad (4.2)$$

и потребителей:

$$\frac{D_i}{\omega_R} \dot{\delta}_i = A_i^{SP} - \sum_{j=n_g+1, j \neq i}^N K_{ij}^{SP} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}^{SP}), \quad i = n_g + 1, \dots, N \quad (4.3)$$

$$A_i^{SP} = P_{l,i'}^* - |V_{i'}^*|^2 G_{ii}^{SP}, \quad K_{ij}^{SP} = |V_{i'}^* V_{j'}^* Y_{ij}^{SP}|, \quad \gamma_{ij}^{EN} = \alpha_{ij}^{EN} - \frac{\pi}{2}, \quad Y_{ij}^{SP} = |Y_{ij}^{SP}| \exp(j\alpha_{ij}^{SP}), \quad i' = i - n_g, \quad j' = j - n_g \quad (4.4)$$

ω_R – опорная угловая частота, равна частоте физической сети, H_i – константа инерции, D_i – константа затухания, A_i – параметр собственных мощностей генератора или потребителя. Параметр K_{ij} – представляет силу динамической связи или максимум взаимных мощностей между осцилляторами i и j , γ_{ij} характеризует фазовый сдвиг. Все представленные параметры системы имеют безразмерный вид. В качестве нормирующей величины используется базовая мощность $P_R = 100\text{MVA}$. Опорная частота системы ω_R равна 314,1593 рад/с или 50 Гц. Параметры правой части уравнения $A_i K_{ij}, \gamma_{ij}$ определяются с

помощью физических параметров реальной энергосети. Собственная мощность генератора A_i^{SP} является безразмерной выходной мощностью генератора $P_{g,i}$.

4.2. Влияние нелинейной диссипации на синхронизацию цепочки осцилляторов в модели с сохранением топологии энергосети

Рассмотрим влияние нелинейной диссипации на модель с сохранением топологии энергосети. Для этого мы модифицируем нашу модель, (4.1, 4.2, 4.3, 4.4)) изменив коэффициент диссипации D на его нелинейную форму (3.3).

Время интегрирования численной модели составляло $T = 100$ при шаге $h = 0.001$ система уравнений была проинтегрирована с помощью метода Рунге–Кутты четвертого порядка с постоянным шагом интегрирования. Система исследовалась при балансе $\sum_{i=1}^N A_i^{gen} = \sum_{i=1}^N A_i^{con}$ генерируемой A_i^{gen} и потребляемой энергии A_i^{con} .

В нашем эксперименте мы будем исследовать систему с различных условий. Для начала мы рассмотрим численную модель, в которой нелинейная диссипация присутствует в осцилляторах, отвечающих за генерацию энергии $i \in [1; 10]$, для остальных осцилляторов $i \in [11; 30]$ значение диссипации постоянно $D = 50$. Выберем начальные условия для осцилляторов, представляющих генераторы, случайным образом $\delta \in [-\pi; \pi]$ для фаз и $\dot{\delta} \in [-100; 100]$ для фазовых скоростей. Для остальных осцилляторов значения δ и $\dot{\delta}$ равны нулю. Рассмотрим случай, когда коэффициент нелинейной диссипации равен нулю и отличен от нуля.

В системе присутствует два кластера осцилляторов. В первый кластер можно отнести неустойчивые осцилляторы с номерами: 1,3,6-9, их частоты $\dot{\delta}$ непрерывно осциллируют во времени. Все остальные осцилляторы имеют фиксированное значение $\dot{\delta}$. Значения фазовой когерентности колеблются в диапазоне $r \in [0.36; 0.41]$. При воздействии нелинейной диссипации с коэффициентом $kd = 1$ энергосеть находится в режиме полного синхронизма, фазовая скорость осцилляторов постоянна и имеет одинаковые значения на всем промежутке времени. Фазовая когерентность в таком случае равна $r =$

0.96. Мы можем наблюдать наличие девиации частоты δ в неустойчивых осцилляторах при отсутствии нелинейной диссипации. При частотной синхронизации усредненная частота δ всех осцилляторов одинакова, а стандартное отклонение отсутствует. Собственные частоты отличны от стандарта сети 50 Hz . Присутствует изменение собственной частоты осцилляторов, отвечающих за генерацию энергии, так для $kd = 0$ собственная частота составляет $\omega_i^* = 58.4685 \text{ Hz}$ и $\langle \omega_i^* \rangle = 58.4262 \text{ Hz}$ для $kd = 1$. Это различие обусловлено изменением значения диссипации, при коэффициенте $kd = 0$ уравнение (3.3) принимает значение $D = 50$, в случае нелинейной диссипации значение D изменяется во времени. Для коэффициента $kd = 1$ усредненная по времени величина $\langle D_i \rangle_t = 50.2511$.

При изменении начальных условий поведение исследуемой системы изменилось, энергосеть включает в себя множество кластеров с различными частотами. Степень когерентности в этом случае варьируется в диапазоне $r \in [0; 0.48]$ на протяжении всего времени счета. Некоторые усредненные по времени частоты $\langle \delta \rangle_t$ находятся вблизи собственных частот ω_i^* . Осцилляторы, отвечающие за генерацию, имеют высокую вариацию частот относительно других осцилляторов.

При введении нелинейной диссипации в осцилляторы, генерирующие энергию, и увеличении коэффициента kd можно выделить два кластера осцилляторов с определенными частотами. Когерентность осцилляторов изменяется сложным образом, вариация величины составляет $r \in [0.15; 0.94]$. Собственные частоты первых десяти осцилляторов изменяются под воздействием нелинейной диссипации. Усредненные частоты осцилляторов $\langle \delta \rangle_t$ находятся вблизи значения 50 Hz , кроме осцилляторов под номерами 23 и 29. Кластер усредненных частот вблизи величины 50 Hz имеем слабую вариацию частоты. Частота 23 осциллятора не является постоянной величиной, а ее усредненное по времени значение сильно отличается от стандарта сети 50 Hz .

Можно сделать вывод, что энергосети не удалось достичь частотной синхронизации всех осцилляторов. Дальнейшее увеличение коэффициента диссипации не приводит к существенным изменениям в энергосети. Когда все осцилляторы имеют случайные начальные условия, наличие нелинейной диссипации исключительно в осцилляторах, отвечающих за генерацию, не является достаточной мерой для достижения частотной синхронизации всех осцилляторов в сети. Присутствие нелинейной диссипации в каждом осцилляторе энергосети, позволяет достичь полной частотной синхронизации.

5. Заключение

В магистерской работе было проведено исследование влияние диссипации на синхронизацию энергосетей. Была рассмотрена кольцевая топология сети из генераторов и потребителей. Исследуемая энергосеть была смоделирована с помощью двух численных моделей: модели эффективной сети и модели с сохранением топологии энергосети.

В модели эффективной сети с постоянным значением диссипации при малой величине коэффициента инерции потеря полного синхронизма системы наступает при больших вариациях генерируемой мощности, таким образом, величина инерции оказывает сильное влияние на устойчивость системы. При малых коэффициентах инерции энергосеть находится в режиме полной синхронизации. При малых значениях инерции энергосеть является более устойчивой к рассинхронизации. При средних значениях выходной мощности происходит потеря устойчивости колебаний осцилляторов и в системе появляется бистабильность. Большая вариация мощности генераторов приводит к потере устойчивости осцилляторов.

В модели эффективной сети с нелинейной диссипацией, увеличение коэффициента диссипации позволяет расширить область синхронизации карты режимов генераторов как по мощности, так и по диапазону коэффициентов инерции, позволяя генераторам работать в синхронном режиме при различных величинах выходной мощности и инерции системы.

В модели сети с сохранением топологии при установлении специальных начальных условий достаточно внести нелинейную диссипацию в осцилляторы отвечающие за генерацию энергии и достичь частотной синхронизации со всеми осцилляторами энергосистемы. Для случайных начальных условий частотная синхронизация достигается за счет внесения нелинейной диссипации во все осцилляторы энергосистемы. Для случая, когда все осцилляторы имеют случайные начальные условия, наличие нелинейной диссипации исключительно в осцилляторах, отвечающих за генерацию, недостаточно для достижения частотной синхронизации всех осцилляторов в сети.

Таким образом, на основе результатов магистерской работы можно заключить, что, нелинейная диссипация может служить средством управления режимами синхронизации электрогенераторов, но применение данного решения синхронизации энергосистем в реальных условиях сильно ограничено. Высокие величины диссипации в реальных электрогенераторах влекут за собой негативные эффекты, такие как снижение эффективности, сильное выделения тепла, перегрев и аварийных выход из строя.

Список используемой литературы

1. Matthias Wolff. Influence of stochastic power generation and network heterogeneities on power grid stability //University Osnabruck 2016, pp 5-18.
2. James F. Heagy, Louis M. Pecora, and Thomas L. Carroll / Short Wavelength Bifurcations and Size Instabilities in Coupled Oscillator Systems // Phys Rev. Lett. 1995. Volume 74, Issues 21, pp. 4185-4188.
3. Nishikawa T., Motter A.E. / Comparative analysis of existing models for powergrid synchronization // New Journal of Physics. 2015. Vol. 17, no. 1, p. 015012.
4. M. S. Mamis and M. E. Meral. / State-space Modeling and Analysis of Fault Arcs // Electric Power Systems Research. 2005. Vol. 76, pp. 46-51.
5. Аринушкин П.А., Анищенко В.С. /Влияние выходной мощности генераторов на частотные характеристики энергосети в кольцевой топологии//Известия вузов. ПНД. 2019. Т. 27, № 6. С. 25–38.