

## Эффекты нелинейной диссипации в модели энергосистемы на основе связанных Курамото-подобных осцилляторов с инерцией\*

П. А. Аринушкин<sup>✉</sup>, Т. Е. Вадивасова

Саратовский национальный исследовательский государственный  
университет имени Н.Г. Чернышевского

✉ arinushkin.pavel@gmail.com

В работе мы моделируем случай неравномерного баланса производимой и потребляемой энергии в модели энергосети. Рассматриваемая энергосистема имеет кольцевую топологию, состоящую из локально подключенных генераторов энергии, чередующихся с потребителями энергии. Каждый элемент представлен в виде фазового осциллятора Курамото с инерцией. Уравнения сети преобразуются в соответствии с моделью эффективной сети, предложенной в [1], а затем изучаются численно. Целью работы является нахождение условий, предотвращающих потерю синхронизации сети. Нелинейная диссипация осцилляторов была предложена как возможное решение проблемы стабилизации синхронности. Были сопоставлены карты режимов, полученные с постоянной диссипацией и с изменяющейся во времени нелинейной диссипацией. Кроме того, нами рассматривается случай внешнего воздействия на отдельный элемент сети в виде прямоугольного импульса с разными параметрами. Результаты исследования показывают, что нелинейная диссипация может предотвратить несинхронное поведение генераторов и повысить устойчивость электросети к внезапным скачкам энергии. Противоположной стороной полученных результатов является ограничение использования нелинейной диссипации. Сильное влияние адаптивной диссипации отрицательно сказывается на эксплуатации подключенных генераторов энергии, что приводит к перегреву и выходу из строя.

Исследуемая в работе Курамото-подобная модель имеет следующий вид:

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

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

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

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

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

\*Работа поддержана РФФ, грант № 20-12-00119.

где  $H_i$  и  $D_i$  – параметры инерции и диссипации  $i$ -го осциллятора, соответственно. В правой части уравнения (1) используются следующие обозначения:  $A_i$  – параметр мощности генератора с учетом диссипативных потерь  $i$ -го генератора, представляющий собой разность выходной мощности генератора  $P_{g,i}$  и произведения квадрата модуля ЭДС генератора на проводимость  $G_{ii}$  (выражение (2)). Параметр  $K_{ij}$  задает силу динамической связи между осцилляторами с номерами  $i$  и  $j$ , выраженную через произведение ЭДС  $E_i, E_j$  двух связанных генерирующих узлов и сопротивления  $Y_{ij}$  между ними (выражение (3)). Параметр  $\gamma_{ij}$ , задаваемый выражением (4), характеризует фазовый сдвиг в цепи связи. Система уравнений (1) описывает энергетическую сеть, как цепочку связанных осцилляторов, основываясь на модели Effective Network, предложенной в [1].

В ходе исследований были установлены области на плоскости управляющих параметров, соответствующие устойчивым синхронным режимам работы энергосети. В работе предлагается модификация элементов сети, позволяющая расширить области синхронной динамики и проводится анализ устойчивости синхронных режимов по отношению к внешним воздействиям. Данная модификация состоит во введении в уравнения осцилляторов нелинейной диссипации. Параметр диссипации  $D_i$  предполагается зависящим от мгновенной частоты  $\dot{\delta}_i(t)$  по закону:

$$D_i = k|\dot{\delta}_i(t)| + D_{0i} \quad (6)$$

где  $k$  – некоторый безразмерный коэффициент, характеризующий степень нелинейности,  $D_{0i}$  – постоянная компонента параметра диссипации.

### Список литературы

1. *Nishikawa T., Motter A.* Comparative analysis of existing models for power-grid synchronization // *New Journal of Physics*, 2015, 17, 15012.  
<https://doi.org/10.1088/1367-2630/17/1/015012>