

**НИЗКОЧАСТОТНЫЕ И СУБСИХРОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ  
ЭНЕРГОСИСТЕМАХ: ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И СРЕДСТВА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ**

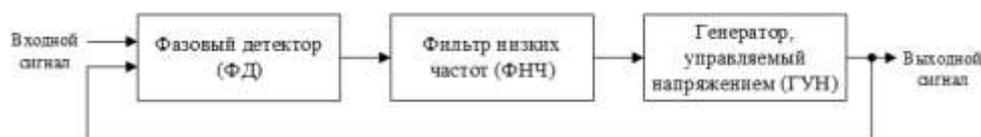
**Петрова А.Е.**

Научный руководитель доцент А.А. Суворов

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

В процессе эксплуатации электроэнергетических систем с объектами генерации на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) в разных странах мира были зафиксированы случаи возникновения низкочастотных и субсинхронных колебаний параметров режима. Так, в энергосистеме Техаса наблюдались колебания с частотой 4 Гц, в энергосистеме Китая – с частотой 30 Гц [3]. Кроме того, субсинхронные колебания параметров режима в Синьцзян-Уйгурском автономном районе Китая привели к возникновению крутильных колебаний на валах турбогенераторов с последующим их отключением [4]. В свете указанных событий актуальным становится изучение причин и средств предотвращения такого рода взаимодействий в энергосистемах с ВИЭ. Тренд на внедрение ВИЭ-генерации не обошел и Россию. Так, по состоянию на июль 2022 года суммарная установленная мощность объектов генерации на возобновляемых источниках энергии составила 5,47 ГВт. Из них по 2,1 ГВт приходится на ветровые и солнечные электростанции [7]. В будущем эти показатели будут увеличиваться, поэтому результаты данной работы могут быть в перспективе использованы при эксплуатации российских электростанций на ВИЭ. Стоит отметить, что причины возникновения субсинхронных и низкочастотных колебаний были рассмотрены на примере ветроэнергетических установок (ВЭУ) 4-го типа на базе синхронного генератора на постоянных магнитах, связь которых с энергосистемой осуществляется через силовой преобразователь. Фотоэлектрические установки подключаются к сети посредством такого же рода преобразователей, поэтому указанные причины будут справедливы и для них. Анализ исследований по теме низкочастотных и субсинхронных колебаний показал, что наиболее подвержены таким воздействиям оказываются сети с низким (меньше 3) отношением короткого замыкания (ОКЗ). Такие сети называют слабыми, поскольку они оказываются менее стабильными по напряжению при возникновении неисправностей, чем сильные сети. Они имеют место в энергосистемах с удаленной от традиционных электростанций ВИЭ-генерацией. Как правило, исследования режимов с возникновением колебаний проводятся в очень слабых сетях с ОКЗ меньше 2. В ходе анализа литературы по теме в качестве основных факторов, влияющих на возникновение того или иного вида колебаний, были выделены индуктивное сопротивление линии связи ВИЭ-генерации с системой и параметры контроллера сетевого преобразователя (инвертора) установки. С увеличением индуктивного сопротивления ОКЗ уменьшается – система становится более подвержена возникновению нестабильных субсинхронных взаимодействий [4]. Вторым фактором, влияющим на возникновение и характер колебаний, оказываются параметры сетевого инвертора. Это могут быть как пропорциональные и интегральные коэффициенты передаточных функций инвертора [4], так и параметры целых контуров, например, контура фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [2]. Изменение ОКЗ возможно за счет строительства дополнительных линий связи, тогда как изменение параметров сетевого инвертора требует исследования возможных режимов и настройки, поэтому в дальнейшем будут рассмотрены мероприятия по улучшению параметров инвертора.

Структурная схема ФАПЧ изображена на рисунке 1 [5].



**Рис. 1. Структурная схема контура фазовой автоподстройки частоты**

Контур фазовой автоподстройки частоты позволяет подстраивать фазу управляемого генератора так, чтобы она была равна фазе входного сигнала. Сравнение входного и выходного сигналов происходит с помощью фазового детектора, определяющего разность фаз. Фильтрация сигнала происходит в ФНЧ, после чего он поступает на генератор, управляемый напряжением, и таким образом влияет на частоту колебаний генератора [5]. В качестве параметра ФАПЧ, влияющего на характер возникающих колебаний, была рассмотрена ширина полосы пропускания контура. При ступенчатом изменении напряжения цепи постоянного тока в точке подключения генерирующей установки к сети наблюдаются колебания напряжения. При ширине полосы пропускания 17 Гц имеют место низкочастотные колебания, при 40 Гц доминирующими являются субсинхронные колебания, при 60 Гц присутствуют оба вида колебаний, при 70 Гц – субсинхронные колебания. В первом и последнем случаях колебания оказываются незатухающими и подавляются путем уменьшения мощности генерирующих установок. Во втором и третьем случаях все виды колебаний со временем затухают. Результаты данного исследования показывают во-первых, что субсинхронные и низкочастотные колебания могут существовать независимо друг от друга, во-вторых – с увеличением ширины полосы пропускания преобладающими становятся субсинхронные колебания [2].

В результате анализа характера корней характеристического уравнения инвертора с ФАПЧ в составе были получены следующие выводы. При увеличении ширины полосы пропускания контура в пределах от 10 Гц до 100 Гц увеличивается запас колебательной устойчивости системы, поскольку пересечение мнимой оси происходит при большем коэффициенте усиления ФАПЧ. Также было выявлено влияние пропорционального коэффициента ФАПЧ: чем он больше, тем больше оказывается ширина полосы пропускания контура [1]. Резюмируя, причинами возникновения низкочастотных и субсинхронных колебаний в энергосистемах с ВИЭ являются низкое ОКЗ и параметры силовых преобразователей, которые требуют грамотной настройки. Особого внимания заслуживают

параметры ФАПЧ, поскольку от них зависит частота возникающих колебаний. Рассмотрим в качестве альтернативы традиционной схеме ФАПЧ с пропорционально-интегральным (ПИ) контроллером схему с контроллером опережения и запаздывания (the lead/lag PLL). Схемы указанных модификаций приведены на рисунке 2.

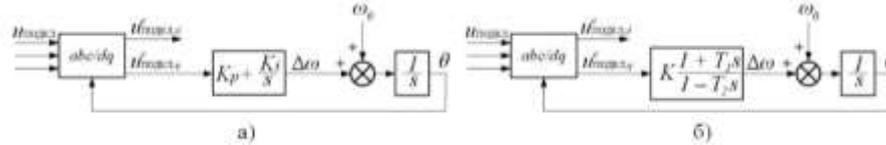


Рис. 2. Структура ФАПЧ: а) – на основе синхронной системы отсчета; б) – с индикацией опережения-запаздывания [3]

Использование ПИ-регулятора позволяет получить нулевую установившуюся ошибку при ступенчатом изменении напряжения. Однако при ступенчатом изменении производной напряжения появляется установившаяся ошибка. Увеличение пропускной способности ФАПЧ приведет к снижению величины ошибки и одновременно к искажению напряжения [6]. Звено опережения и запаздывания обладает лучшими фильтрующими характеристиками в указанных условиях, что подтверждается результатами моделирования во временной области в исследовании [3]. При скачкообразном увеличении индуктивного сопротивления линии электропередачи в случае ФАПЧ с ПИ-регулятором наблюдалось появление низкочастотных колебаний параметров режима, тогда как при использовании звена опережения и запаздывания система оказывалась стабильной. Схема дополнительного подсинхронного контура управления демпфированием приведена на рисунке 3.

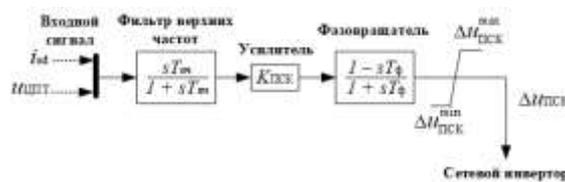


Рис. 3. Структурная схема дополнительного подсинхронного контура управления демпфированием [4]

В качестве входного сигнала для данного контура могут использоваться выходной ток инвертора или напряжение цепи постоянного тока. Фильтр верхних частот используется для выделения соответствующего субсинхронного сигнала. Усилитель и фазовращатель позволяют гибко регулировать амплитуду и фазу сигнала для достижения лучших характеристик управления. Управляющий сигнал подсинхронного контура добавляется к выходному напряжению инвертора. С помощью применения данного контура можно эффективно демпфировать возникающие субсинхронные колебания, что подтверждается результатами моделирования во временной области в работе [4].

В ходе выполнения данной работы были проанализированы факторы, оказывающие влияние на характер возникающих колебаний и степень их демпфирования в энергосистемах с ВИЭ. Среди них особо выделяются параметры контура фазовой автоподстройки частоты, от которых зависит ширина полосы пропускания контура и, как следствие, характер возникающих колебаний. В качестве средств предотвращения возникновения устойчивых колебаний были рассмотрены ФАПЧ с индикацией опережения и запаздывания и дополнительный подсинхронный контур управления демпфированием, результаты моделирования которых говорят об их положительном влиянии на демпфирование колебаний. Дальнейшие работы будут посвящены выбору оптимального инструмента для предотвращения низкочастотных и субсинхронных колебаний и его настройке.

#### Литература

1. Fan L. Modeling type-4 wind in weak grids //IEEE Transactions on Sustainable Energy. – 2018. – Т. 10. – №. 2. – С. 853-864.
2. Fan L., Miao Z. Wind in weak grids: 4 Hz or 30 Hz oscillations? //IEEE Transactions on Power Systems. – 2018. – Т. 33. – №. 5. – С. 5803-5804.
3. Li Y., Fan L., Miao Z. Wind in weak grids: Low-frequency oscillations, subsynchronous oscillations, and torsional interactions //IEEE Transactions on Power Systems. – 2019. – Т. 35. – №. 1. – С. 109-118.
4. Liu H. et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks //IEEE Transactions on Power Systems. – 2017. – Т. 32. – №. 6. – С. 4708-4720.
5. Keim, R. What Exactly Is a Phase-Locked Loop, Anyway [Электронный ресурс] / R. Keim // All about circuits. – March 09, 2018. Режим доступа: <https://www.allaboutcircuits.com/>.
6. Zhan C. et al. Software phase-locked loop applied to dynamic voltage restorer (DVR) //2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37194). – IEEE, 2001. – Т. 3. – С. 1033-1038.
7. Рынок возобновляемой энергетики России: текущий статус и перспективы развития: информационный бюллетень // Ассоциация развития возобновляемой энергетики, июль 2022. Режим доступа: <https://reda.ru/information-bulletin-july2022>.