

# ВЛИЯНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ СО СТАНДАРТНОЙ СТРУКТУРОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.Б. Аскарлов, А.А. Суворов, В.Е. Рудник  
Томский политехнический университет  
ОЭЭ ИШЭ

Внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ), которые используют в своей структуре силовой преобразователь (СП) для подключения к электрической сети, в настоящий момент является одним из основных направлений развития современных электроэнергетических систем (ЭЭС) [1]. При этом применение подобного типа генерирующих установок (ГУ) оказывает существенное влияние на режимы и процессы в ЭЭС. Данный факт определяется динамикой функционирования ГУ на базе ВИЭ с СП, которая значительно отличается от свойств и характеристик традиционной синхронной генерации.

Одним из основных элементов в составе ГУ с СП, определяющим их динамический отклик и в целом работу при определенных условиях режима ЭЭС, является система автоматического управления (САУ) СП. В настоящее время во многих исследованиях отмечается, что «стандартная» структура САУ СП, включающая использование замкнутого контура регулирования фазы (ЗКРФ) для формирования фазового угла напряжения сети в точке подключения ГУ и, соответственно, управления СП в синхронно вращающейся системе координат, становится причиной возникновения колебаний режимных параметров в широком диапазоне частот и нарушения устойчивости ЭЭС в целом, в частности, при увеличении внедряемой мощности ВИЭ [2, 3]. Подобное связано с принципом управления ВИЭ, в котором СП является ведомым сетью. Таким образом в работе рассмотрено влияние различных структур ЗКРФ в составе стандартной САУ ВИЭ на устойчивость ГУ и ЭЭС в целом, а также приведены некоторые подходы, направленные на улучшение функционирования ГУ на базе ВИЭ с СП в составе современных ЭЭС.

В литературе встречаются различные структуры реализации ЗКРФ, наиболее распространенные из которых приведены на рис. 1 [4]. При этом рассматриваются ЗКРФ «стандартного» типа (ЗКРФ1 – рис. 1а), трансвекторного типа (ЗКРФ2 – рис. 1б) и на основе функции  $\operatorname{atan}2$  (ЗКРФ3 – рис. 1в). Каждая структура ЗКРФ состоит из трех основных частей:

1. Фазового детектора (ФД), который измеряет вектор трехфазного напряжения в месте подключения ВИЭ. Затем осуществляется преобразование напряжения из трехфазной системы координат  $abc$  в неподвижную двухфазную систему координат  $\alpha\beta$  или вращающуюся систему координат  $dq$ .
2. Контурного фильтра (КФ), который обычно представляется в виде пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятор), являющегося наиболее распространенным на практике в связи с простотой

настройки, возможностью обеспечения нулевой статической ошибки регулирования, а также малой чувствительностью к шумам.

3. Генератора, управляемого напряжением (ГУН), который формирует выходной сигнал в виде угла  $\theta_{ЗКРФ}$  на основе получаемой частоты сигнала  $\omega_{ЗКРФ}$ . ГУН обычно реализуется в виде идеального интегрального звена с ограничениями и сбросом, на выходе которого образуется пилообразный сигнал угла  $\theta_{ЗКРФ}$ .

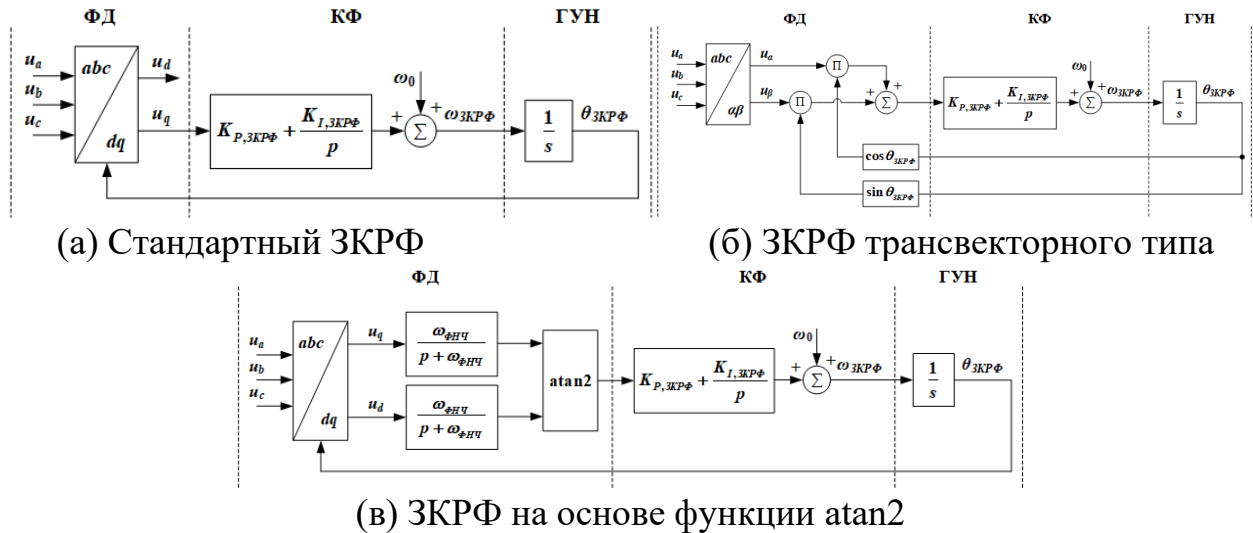


Рис. 1. Рассматриваемые структуры ЗКРФ

Как видно из рис. 1, структуры КФ и ГУН для каждого рассматриваемого типа ЗКРФ являются одинаковыми. Основные различия заключаются в структуре ФД и, соответственно, используемых в КФ входных сигналов. Параметрами настройки ЗКРФ являются коэффициенты усиления ПИ-регулятора ( $K_{P,ЗКРФ}$  и  $K_{I,ЗКРФ}$ ), а также частота среза  $\omega_{ФНЧ}$  фильтра нижних частот (ФНЧ) в составе ЗКРФ3. Добавление фильтра перед ПИ-регулятором позволяет дополнительно уменьшить чувствительность ЗКРФ к шумам и снизить вероятность возникновения численной неустойчивости при расчете  $\omega_{ЗКРФ}$ . Параметры настройки ЗКРФ разного типа приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры настройки ЗКРФ

Тип ЗКРФ	$K_{P,ЗКРФ}$	$K_{I,ЗКРФ}$	$\omega_{ФНЧ}$
ЗКРФ1	0,2659 о.е.	10,9988 о.е./с	—
ЗКРФ2	0,2659 о.е.	10,9988 о.е./с	—
ЗКРФ3	0,2659 о.е.	10,9988 о.е./с	600 рад/с

Исследования выполнялись на тестовой двухмашинной схеме [5]. Суть экспериментов заключалась в постепенном увеличении внедряемой мощности ВИЭ при разных структурах ЗКРФ в составе их САУ. Полученные результаты приведены на рис. 2.

Как видно каждая структура ЗКРФ позволяет внедрить примерно одинаковую мощность ВИЭ (около 16 МВт) без нарушения устойчивости. При этом дальнейшее увеличение внедряемой мощности приводит к возникновению колебаний (в диапазоне 88–90 Гц) с увеличивающейся амплитудой, что свидетельствует о нарушении устойчивости функционирования ГУ на базе ВИЭ с СП. Для

модели САУ с ЗКРФ2 характерна большая амплитуда колебаний ( $\Delta P = 2,5$  МВт), чем для случаев с ЗКРФ1 и ЗКРФ2, у которых она примерно одинакова ( $\Delta P = 1,7$  МВт). Дальнейшее увеличение мощности ВИЭ приводит к потере синхронизма ЗКРФ и, соответственно, всей ГУ в целом.

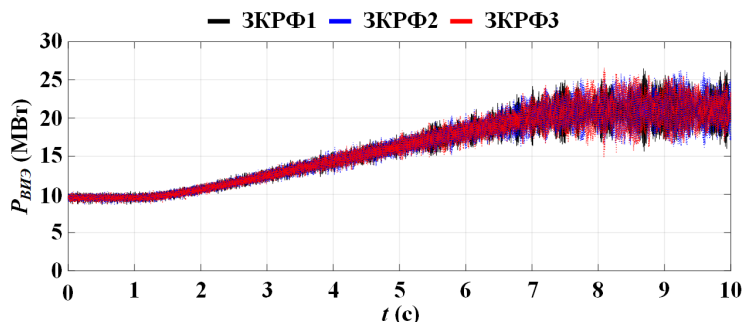


Рис. 2. Активная мощность ВИЭ

За счет увеличения коэффициентов ЗКРФ и, соответственно, его полосы пропускания можно добиться большего значения внедряемой мощности ВИЭ, при котором не наблюдается нарушение устойчивости функционирования ЭЭС. При  $K_{R,ЗКРФ} = 5$  о.е. и  $K_{L,ЗКРФ} = 100$  о.е./с значение  $P_{внед,макс} = 18,5$  МВт, что на 15% больше, чем при изначальной настройке ЗКРФ. Однако увеличение коэффициентов усиления приводит к закономерному уменьшению запасов динамической устойчивости ВИЭ, которые косвенно можно оценить с помощью предельного времени отключения трехфазного короткого замыкания (ПВКЗ). В табл. 2 приведены получившиеся значения ПВКЗ при изначальных и измененных в большую сторону коэффициентах ЗКРФ различной структуры. Из представленных результатов видно заметное снижение ПВКЗ и, соответственно, запасов динамической устойчивости ГУ на базе ВИЭ с СП.

Таблица 2. Результаты анализа ПВКЗ

Тип ЗКРФ	ПВКЗ (мс)	
	Настройка 1	Настройка 2
ЗКРФ1	230	160
ЗКРФ2	240	160
ЗКРФ3	220	170

Таким образом, комплексное решение проблемы обеспечения устойчивости функционирования ГУ на базе ВИЭ с СП, как это отмечается во многих работах, возможно за счет использования дополнительных звеньев или контуров в структуре САУ, которые обеспечивают более устойчивое функционирование ЗКРФ [6], или с помощью разработки и применения новых подходов к управлению ВИЭ, в которых исключается необходимость использования ЗКРФ, например, концепции виртуального синхронного генератора [7].

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00129.*

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Рубан Н.Ю., Аскарлов А.Б., Андреев М.В., Киевец А.В., Рудник В.Е. Анализ влияния возобновляемых источников энергии с силовыми преобразователями на процессы в современных энергосистемах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 36. – С. 7–30.
2. Zuo Y., Yuan Z., Sossan F., Zecchino A., Cherkaoui R., Paolone M. Performance assessment of grid-forming and grid-following converter-interfaced battery energy storage systems on frequency regulation in low-inertia power grids // Sustainable Energy, Grids and Networks. – 2021. – № 27. – 100496.
3. Hatziargyriou N. и др. Definition and Classification of Power System Stability - Revisited & Extended // IEEE Transactions on Power Systems. – 2021. – № 36(4). – P. 3271–3281.
4. Guo X.-Q., Wu W.-Y., Gu H.-R. Phase locked loop and synchronization methods for grid-interfaced converters: A review // Przegląd Elektrotechniczny. – 2011. – № 87(4). – P. 182–187.
5. Танфильев О.В., Филиппова Т.А., Танфильева Д.В. Особенности параметрирования автоматики ликвидации асинхронного хода в неполнофазных режимах // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2018. – № 2 (71). – С. 175–187.
6. Li Y., Fan L., Miao Z. Wind in Weak Grids: Low-Frequency Oscillations, Subsynchronous Oscillations, and Torsional Interactions // IEEE Transactions on Power Systems. – 2020. – № 35(1). – P. 109–118.
7. Cheema K.M. A comprehensive review of virtual synchronous generator // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2020. – № 120. – 106006.

Научный руководитель: А.А. Суворов, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

### **ФОРМИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ВЕТРОГЕНЕРАТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ**

Ю.Д. Бай<sup>1</sup>, И.А. Разживин<sup>1</sup>, Я.Ю. Малькова<sup>2</sup>  
Томский политехнический университет<sup>1,2</sup>  
ИШЭ, ОЭЭ<sup>1,2</sup>, группа 5АМ11<sup>2</sup>

В связи с тенденцией увеличения потребления электроэнергии, сложившейся за последние 15-20 лет, модернизация современных электроэнергетических систем (ЭЭС) является актуальной [6]. Принимая во внимание стремление ведущих стран к сохранению окружающей среды, они постепенно переходят на использование возобновляемых источников энергии.