

расположение корней характеристического уравнения при внедрении объекта ВИЭ в Зону 1 оказывается левее, чем при внедрении объекта аналогичной мощности в Зону 2. На основании чего можно сделать вывод, что Зона 1 является более предпочтительной для установки новых генерирующих мощностей на основе ВИЭ.

Однако, согласно проведенным исследованиям, обозначенная выше тенденция положительного влияния внедрения объектов ВИЭ на устойчивость ЭЭС сохраняется вплоть до доли ВИЭ от суммарной установленной мощности энергорайона, равной 30 %. Дальнейшее увеличение доли объектов ВИЭ приводит к описанным выше последствиям – появлению незатухающих колебаний мощности и нарушению устойчивости ЭЭС. Одним из возможных решений в данном случае может быть дополнение системы автоматического управления (САУ) сетевым инвертором на основе СПН регулятором демпфирования колебаний мощности и его настройка, что позволит увеличить долю объектов ВИЭ вплоть до 50 %. После чего необходимо принципиальное изменение реализованного в САУ алгоритма управления, например, применение технологии виртуального синхронного генератора (ВСГ), позволяющего объектам ВИЭ имитировать статические и динамические характеристики традиционных синхронных генераторов, для существенного улучшения демпфирующих свойств ЭЭС.

Литература

1. Kundur P. Power system stability, Power System Stability and Control //Chapter7. Boca Raton, FL: CRC. – 2007.
2. Liu C. et al. Oscillation analysis and wide-area damping control of DFIGs for renewable energy power systems using line modal potential energy //IEEE Transactions on Power Systems. – 2018. – Т. 33. – № 3. – С. 3460-3471.
3. Milano, F. An Open Source Power System Analysis Toolbox // IEEE Transactions on Power Systems. – 2005. – V. 20. – Is. 3. – P. 1199-1206.
4. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2023 году (на основе оперативных данных). АО «СО ЕЭС» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2024/ups_rep2023.pdf.
5. Указ Президента РФ от 28.02.2024 г. № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202402280003?index=10>.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА ЛИНЕАРИЗОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ С УЧЕТОМ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Малюта Б.Д.

Научный руководитель доцент А.А. Суворов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Введение. На сегодняшний день интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в современные энергосистемы (ЭС) является одним из ведущих направлений развития электроэнергетики. Данные, собранные Международным Агентством по Возобновляемой Энергии (IRENA) за период с 2012 по 2021 год, свидетельствуют о росте процента от общей генерации, приходящегося на мощности, источниками первичной энергии которых являются ВИЭ [1].

В то же время данная тенденция приводит к возникновению существенных проблем с устойчивостью ЭС, т.к. ВИЭ-генерация не вносит вклада в общую инерцию ЭС из-за отсутствия либо непосредственной электрической связи с ЭС, либо запасов кинетической энергии, необходимых для обеспечения инерции [2]. Последнее становится все менее значимым в контексте современных энергосистем, т.к. всё большее количество современных объектов ВИЭ-генерации интегрируются в ЭС посредством силовых преобразователей (СП) – инверторов, управляемых специальными алгоритмами. Как отмечается в [3], рост числа СП в ЭС приводит к значительным изменениям динамических свойств ЭС относительно традиционных ЭС, в которых преобладают синхронные генераторы, а также к возникновению новых видов колебаний, проблем в области устойчивости и значительного числа прочих негативных факторов, влияющих на устойчивую и безопасную работу ЭС.

Одним из возможных решений вышеперечисленных проблем является соответствующая настройка системы управления (СУ) СП. Вариант реализации алгоритма для такой настройки предложен в [4]. Впрочем, сложность такого подхода состоит в необходимости применения средств модального анализа, реализация которых без должной автоматизации трудоёмка и занимает значительное время. Также без автоматизации невозможна автоматическая подстройка параметров системы под изменяющиеся условия работы. Таким образом становится актуальной разработка средств автоматической реализации расчёта параметров СУ СП на основании результатов модального анализа.

Данная работа посвящена демонстрации первичных результатов разработки программного обеспечения для автоматизации определения параметров СУ СП.

Описание разрабатываемого программного обеспечения. На текущем этапе разрабатываемое программное обеспечение реализуется в виде объекта MATLAB App в программном комплексе MATLAB. Реализация подобным образом позволяет упростить решение вопросов, связанных с графическим интерфейсом и способом задания входным данным, т.к. исследуемая модель в линеаризованном виде может быть задана посредством внутреннего языка программирования MATLAB и считана программой через обращение к пространству переменных модели (base workspace).



Рис. 1. Структурная схема актуальной версии программного обеспечения

В текущем виде программное обеспечение позволяет импортировать модель из пространства переменных, рассчитывать моды колебаний и визуализировать их в табличном виде и на корневом годографе. Структура программы приведена на рисунке 1.

После нажатия кнопки «Calculate eigenvalues» программа извлекает данные из выбранной пользователем переменной (её имя нужно ввести в текстовое поле) и записывает значение в промежуточную переменную. Затем происходит расчёт собственных чисел и вывод полученных результатов в табличном виде. В таблице представлены как собственное число целиком, так и в отдельности его действительная и мнимая части. По нажатии кнопки «Plot root locus» происходит вывод результатов в виде корневого годографа.

Верификация результатов. Для верификации результатов расчёта программы была использована модель из [6]. Результаты расчёта собственных чисел, приведённые в [6], представлены в таблице 1. Результаты расчёта и внешний вид программы приведены на рисунке 2.

Таблица 1

Собственные числа матрицы состояний A

λ_1	$-174 + j2607$	λ_4	$-37 - j2127$	λ_7	$-1776 + j144$	λ_{10}	$-0.1 - j4$	λ_{13}	-0.3
λ_2	$-174 - j2607$	λ_5	-5000	λ_8	$-1776 - j144$	λ_{11}	-31		
λ_3	$-37 + j2127$	λ_6	-3200	λ_9	$-0.1 + j4$	λ_{12}	-32		

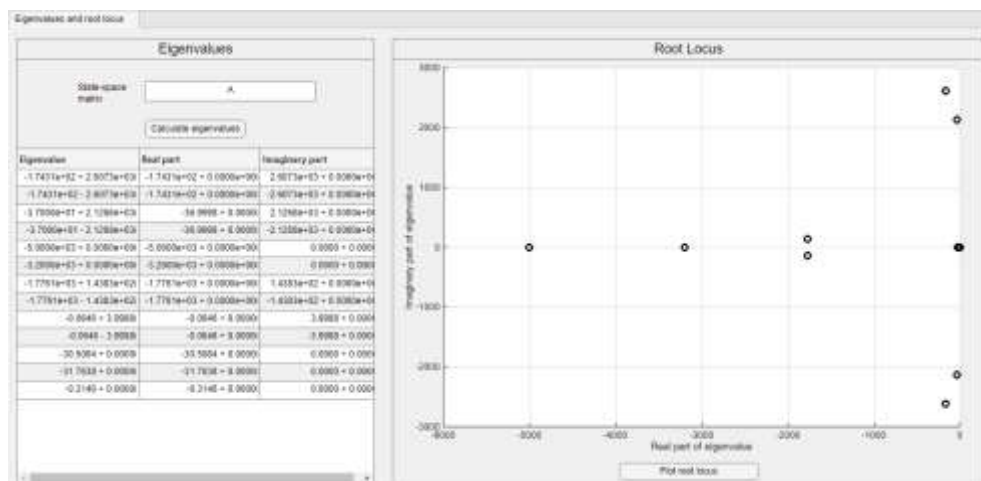


Рис. 2. Результаты расчёта и внешний вид программы

Полученные результаты полностью соответствуют [6].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00004.

Литература

- IRENA (2022), Renewable Energy Statistics 2022, The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- Tielens P., Van Hertem D. The relevance of inertia in power systems // Renewable and sustainable energy reviews. – 2016. – Т. 55. – С. 999-1009.
- Shair J. et al. Power system stability issues, classifications and research prospects in the context of high-penetration of renewables and power electronics // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Т. 145. – С. 111111.
- D'Arco S., Suul J. A., Fosso O. B. Control system tuning and stability analysis of virtual synchronous machines // 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. – IEEE, 2013. – С. 2664-2671.
- Suvorov A. et al. Comparative small-signal stability analysis of voltage-controlled and enhanced current-controlled virtual synchronous generators under weak and stiff grid conditions // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2023. – Т. 147. – С. 108891.

6. Малюта Б. Д. Применение модального анализа для изучения динамических свойств энергосистем при интеграции в них возобновляемых источников энергии // Бутаковские чтения: материалы II Всероссийской с международным участием молодежной конференции, 13 -15 декабря 2022 г., Томск. – Томский политехнический университет, 2022. – С. 15-18.

**ПИЛОТНАЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКА УТИЛИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ
В СОСТАВЕ СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ**

Моор Е.Н., Кузнеценкова Д.А.

Научный руководитель профессор наук Д.О. Глушков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

В современном мире одной из главных экологических проблем является загрязнение окружающей среды отходами, производимыми промышленностью и бытовыми хозяйствами [1–7]. Несмотря на усовершенствование системы обращения с отходами, существующие технологии утилизации не приносят радикального решения проблемы [8, 9]. Вариантом решения этих проблем является вовлечение горючих побочных продуктов различных производств (мелкодисперсных твердых частиц) в качестве компонентов суспензионных топлив для термической утилизации с последующей выработкой энергии. В качестве компонентов могут выступать: низкосортные угли, отработанные масла, отходы нефтепереработки, а также торф, биомасса, лесные горючие материалы, пиролизированные автомобильные шины, твердые коммунальные отходы и осадки сточных вод. Для успешного внедрения новых промышленных технологий необходимо провести всестороннее исследования технических, экологических и экономических аспектов данного направления утилизации отходов.

Целью настоящей работы является разработка принципиально новой энергоэффективной и экологически чистой технологии подготовки и сжигания суспензионных топлив на основе промышленных и коммунальных отходов, и создание пилотной энергетической установки, включающей: автоматизированную систему приготовления суспензионного топлива на основе промышленных и коммунальных отходов и автоматизированную систему подачи и сжигания приготовляемого суспензионного топлива.

Для проведения промышленного исследования энергетического применения суспензионных топлив на основе отходов были предварительно проведены полевые испытания (рисунок 1), которые показали, что суспензионное топливо при сжигании в больших объемах при использовании разработанных технических средств (муфельного горелочного устройства) демонстрирует удовлетворительные результаты. Задержка зажигания при впрыске суспензионного топлива не наблюдалось. Температура внутри горелочного устройства находилась в диапазоне 700–850 °С, которая является оптимальной для работы котла, обеспечивая его эффективную работу.



Рис. 1. Проведение полевых испытаний, фото горения суспензионного топлива

Для проведения натурных испытаний теплоэнергетических процессов, протекающих при использовании мультитопливных технологий, была разработана и построена энергетическая установка, способная утилизировать как твердые, так и жидкие горючие отходы. Эта установка представляет собой комплекс взаимосвязанных компонентов, целью которых является производство тепловой энергии. На фотографии, представленной на рисунке 2, можно увидеть данный технологический комплекс. Пилотный проект данной энергетической установки представляет собой технологическое решение, позволяющее использовать альтернативные виды топлива на основе промышленных, коммунальных отходов и низкосортных топлив. Разработанный технологический комплекс позволяет эффективно сжигать разнообразные горючие материалы и производить тепло с минимальными экономическими затратами на исходное топливо в процессе факельного или слоевого сжигания. Кроме того, данная установка обладает функцией автоматического контроля за техническими параметрами, такими как состав топлива, коэффициент избытка воздуха, температура сгорания, время пребывания частиц в камере сжигания, а также уровень антропогенных выбросов в дымовых газах.