



Рис.1. 1-следоделыватель понтонного типа: 1,2-V образные секции следоделывателя; 3- поперечные швеллера; 4- соединительные кронштейны; 5-ползучие опорные пластинки

Выводы: 1. Надежность работы посевного агрегата обеспечивается путем объединения разбрасывателя семян риса со следоделывателем колеи трактора, то есть улучшает управляемость посевного агрегата и устраняет разгрузку передних колес трактора.

2. Следоделыватель должен состоять из двух V-образных понтонов. Расстояние между ними должно быть 400 мм и они должны быть соединены ползучими пластинками.

3. Между стенками следоделывателя и увлажненной почвой должен быть слой воды, который предотвращает налипание увлажненной почвы к стенкам следоделывателя. Вертикальное колебание следоделывателя должно быть не более  $10...15^{\circ}$ .

#### Список использованной литературы:

1. Фозилов Н.Б. Обоснование параметров сеялки для посева риса по воде // Автореф. диссертации к. т. н. - Янгиюль, 1983. -16 с.
2. Шодмонов Х.М. Обоснование типа движителей колесного трактора и выбор орудий для предпосевной обработки рисовых чеков по воде в условиях средней Азии // Автореф. диссертации к. т. н. - Янгиюль, 1982. -17 с.
3. Тураев Б.Т. Шолини сувда экиш агрегатини танлаш. – Тошкент: ТошДТУ, 2015. – 115
4. Тракторы: Теория: Учебник для студентов вузов по спец. «Автомобили и тракторы» / В. В. Гуськов, Н. Н. Велев, Ю. Е. Атаманов и др.; Под общ. ред. В. В. Гуськова. -М.: Машиностроение, 1988. -376 с.: ил.

## ПРОБЛЕМЫ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОУСТАНОВОК И СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

В. Счастный<sup>1</sup>, А. Зеленкевич<sup>2</sup>, В. Збродыга<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет

<sup>2,3</sup> Белорусский государственный аграрный технический университет  
E-mail: <sup>1</sup>val.sc@mail.ru, <sup>2</sup>alex.zelenkewich@yandex.by, <sup>3</sup>vlad1.72@mail.ru

Совместное использование ветроустановок и солнечных батарей приводит к ряду влияний на качество электрической энергии, поскольку данные источники характеризуются различными динамическими свойствами и временными режимами выработки активной мощности, что позволяет компенсировать недостатки каждого из них при индивидуальной эксплуатации. Наличие двух разнородных источников генерации способствует снижению степени колебаний выходного напряжения и частоты, что обусловлено тем, что пики выработки солнечной энергии зачастую компенсируются более устойчивыми

характеристиками ветровой установки, особенно при условии использования соответствующих систем регулирования и синхронизации.

Интеграция солнечной батареи и ветрогенератора позволяет оптимизировать распределение нагрузки и минимизировать появление гармонических искажений, возникающих вследствие нелинейных нагрузок и вариаций в режиме работы источников, что в свою очередь способствует повышению энергоэффективности и снижению затрат на коррекцию качества электроэнергии. В распределённых энергосистемах с высокой долей возобновляемых источников (ВИЭ), таких как солнечные панели и ветрогенераторы, управление мощностью становится сложной задачей из-за высокой изменчивости генерации. Основные проблемы включают: краткосрочные и долгосрочные флуктуации мощности, вызванные изменениями солнечного излучения и скорости ветра; несоответствие выработки и потребления, требующее оперативного перераспределения мощности; проблемы стабильности сети, связанные с изменениями напряжения, частоты и реактивной мощности.

Для эффективного распределения мощности в таких системах используются несколько ключевых подходов:

1. Алгоритмы децентрализованного управления (Droop Control, VSG).
2. Оптимальное управление энергией с использованием предиктивного управления (MPC).
3. Гибридные системы с накопителями энергии (BESS).
4. Интеллектуальные распределённые сети (Smart Grids) и технологии обмена данными.

Децентрализованное управление, основанное на алгоритмах дроп-контроля (Droop Control) и виртуальных синхронных генераторов (VSG, Virtual Synchronous Generator), позволяет распределять активную и реактивную мощность без необходимости централизованного диспетчерского управления. Дроп-контроль снижает выходную мощность генератора при увеличении частоты, балансируя нагрузку между источниками. Дополнительно значительное внимание уделяется реализации виртуальных синхронных генераторов (VSG). VSG моделируют поведение традиционных синхронных генераторов, улучшая инерционные свойства системы<sup>13</sup>. Эти алгоритмы способствуют повышению устойчивости сети и облегчают интеграцию возобновляемых источников, таких как солнечные батареи и ветрогенераторы, за счёт имитации инерционных свойств больших генераторов, что способствует снижению частотных колебаний. Алгоритмы Model Predictive Control (MPC) позволяют прогнозировать изменения генерации ВИЭ и заранее корректировать распределение мощности между источниками и накопителями. Этот метод особенно эффективен в условиях изменяющегося спроса и колеблющейся генерации<sup>14</sup>, минимизируя скачки напряжения и колебания частоты. Преимущество данного подхода заключается в возможности учета ограничений системы и оперативном реагировании на динамические изменения внешних условий. Адаптивные алгоритмы управления, включая алгоритмы с нечеткой логикой, эффективно справляются с неопределенностями, присущими возобновляемым источникам энергии, обеспечивая плавное переключение между режимами работы за счет корректировки параметров управления в зависимости от текущего состояния системы. Такой подход позволяет поддерживать стабильность сети даже при резких изменениях мощности, вызванных изменением погодных условий или нагрузки.

Использование методов дроп-контроля в связке с виртуальными синхронными генераторами дает возможность имитировать поведение традиционных

<sup>13</sup> Bevrani H, Ise T, Miura Y (2014) Virtual Synchronous Generators: A Survey and New Perspectives. International Journal of Electrical Power and Energy Systems (IJPES), Vol: 54. pp: 244-254. Jan 2014

<sup>14</sup> Alharbi, Yousef, Ahmed Darwish, and Xiandong Ma. 2025. "A Review of Model Predictive Control for Grid-Connected PV Applications" Electronics 14, no. 4: 667. <https://doi.org/10.3390/electronics14040667>

синхронных машин, что способствует более мягкому переходу между режимами и уменьшению негативного влияния резких изменений выработки на качество электроэнергии. Совокупное применение этих алгоритмов обеспечивает высокий уровень надежности и эффективности гибридной системы, позволяя оперативно адаптироваться к изменениям внешних условий и сохранять стабильность сетевых параметров. Использование систем накопления энергии (BESS, Battery Energy Storage Systems) позволяет сглаживать колебания генерации, накапливая избыточную энергию в периоды высокой выработки и отдавая её в сеть при дефиците. Современные алгоритмы оптимального управления зарядом/разрядом аккумуляторов помогают повысить стабильность системы<sup>15</sup>.

Использование технологий Smart Grid, таких как IoT и машинное обучение, позволяет в реальном времени анализировать состояние энергосистемы и адаптировать стратегии распределения мощности. Развитие протоколов коммуникации и автоматизированных систем управления улучшает реакцию сети на изменения генерации<sup>16</sup>.

Современные инверторные технологии, применяемые для обеспечения высокого качества электроэнергии в гибридных энергетических системах, включают в себя мультиуровневые инверторы, позволяющие снизить уровни гармонических искажений и улучшить форму выходного напряжения за счёт использования нескольких ступеней синтеза сигнала; инверторы с цифровым управлением, реализующие алгоритмы векторного управления и позволяющие оперативно корректировать активную и реактивную мощности в ответ на изменения условий генерации; а также устройства с функцией отслеживания максимальной точки мощности (MPPT), оптимизирующие работу солнечных батарей в реальном времени. Также широко применяются трансформаторлес-инверторы, обладающие повышенной эффективностью и меньшими размерами, что делает их привлекательными для распределённых энергетических систем. Интеграция этих технологий позволяет обеспечить плавное переключение между источниками энергии и поддерживать стабильные параметры сети даже при наличии переменных условий генерации.

Мультиуровневые инверторы представляют собой один из ключевых элементов современной схемотехники для преобразования энергии, позволяя синтезировать выходное напряжение с меньшим уровнем гармоник и лучшей формой сигнала за счёт разбиения напряжения на несколько дискретных уровней. Это особенно важно для гибридных энергетических систем, где качество электроэнергии напрямую зависит от способности оборудования адаптироваться к переменным условиям выработки, характерным для ветрогенераторов и солнечных батарей. Одной из распространённых топологий является нейтраль-точечная (Neutral-Point-Clamped, NPC) архитектура, которая позволяет достичь высокого качества выходного напряжения за счёт использования нескольких конденсаторных каскадов для формирования промежуточных уровней напряжения. Преимущество такой топологии заключается в снижении пульсаций и гармонических искажений, что уменьшает требования к дополнительным фильтрам и повышает надёжность работы системы. Другим важным решением являются каскадные инверторы с автономными источниками напряжения, которые, благодаря модульной структуре, обеспечивают гибкость масштабирования и упрощённую диагностику неисправностей.

<sup>15</sup> M. Javadi, X. Liang, Y. Gong and C. Y. Chung, "Battery energy storage technology in renewable energy integration: a review," 2022 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Halifax, NS, Canada, 2022, pp. 435-440, doi: 10.1109/CCECE49351.2022.9918504

<sup>16</sup> Nawaz, Muhammad Kashif & Zafar, S.. (2013). «Integration of renewable energy sources in smart grid: a review». The Nucleus. 50. 311-327

Кроме того, применение мультиуровневых инверторов<sup>17</sup> позволяет снизить напряжённость переключения, что значительно уменьшает электромагнитные помехи (ЭМП) и тепловые потери, а также повышает общую энергоэффективность гибридных систем. Это достигается за счёт того, что каждый отдельный элемент инвертора работает в пределах более узкого диапазона напряжений, что упрощает реализацию алгоритмов управления активной и реактивной мощностью. В свою очередь, современные цифровые системы управления с алгоритмами векторного регулирования и отслеживанием максимальной точки мощности (MPPT) эффективно интегрируются с мультиуровневыми инверторами, обеспечивая плавное переключение между источниками энергии и устойчивость сетевых параметров<sup>18</sup>.

На практике реализация NPC-инверторов находит применение в системах среднего и высокого напряжения, а также в промышленных приводах и распределённых генерационных установках. Важным аспектом является обеспечение равновесия напряжения на конденсаторных каскадах, что требует использования специальных алгоритмов управления и балансировки. Современные исследования демонстрируют, что применение методов активного и пассивного балансирования позволяет добиться стабильного распределения напряжения, повышая надёжность работы инвертора в условиях динамически изменяющихся нагрузок.

Цифровые системы управления с высокой скоростью обработки данных являются неотъемлемой частью современных гибридных энергетических систем, позволяющих реализовывать сложные алгоритмы векторного управления и системы отслеживания максимальной точки мощности (MPPT). Такие системы, часто основанные на архитектуре цифровых сигнальных процессоров (DSP) или полевых программируемых вентильных матриц (FPGA), обеспечивают минимальные задержки обработки сигналов, высокую точность синхронизации и адаптивность к быстроменяющимся параметрам сети. Векторное управление, реализуемое с помощью данных систем, позволяет декомпозировать комплексное управление асинхронными и синхронными машинами на независимые оси, что обеспечивает улучшенную динамику, повышение устойчивости и снижение гармонических искажений в преобразователях энергии. При этом алгоритмы MPPT<sup>19</sup>, встроенные в цифровые контроллеры, оптимизируют режим работы солнечных батарей, позволяя непрерывно корректировать рабочую точку для максимизации извлекаемой мощности в зависимости от изменений солнечной радиации и температуры модулей. Преимуществом такого комплексного подхода является возможность интегрировать в одну систему как высокоточные алгоритмы управления динамикой электродвигателей, так и адаптивные стратегии управления возобновляемыми источниками, что особенно важно для распределённых энергетических систем, где условия генерации могут изменяться с высокой скоростью<sup>20</sup>.

Вывод. Эффективное управление мощностью в распределённых системах с ВИЭ требует сочетания предиктивного управления (MPC), гибридных систем с накопителями энергии (BESS), интеллектуальных алгоритмов (Smart Grid) и дроп-контроля (VSG, Droop Control). Эти технологии позволяют обеспечить надёжность работы энергосистемы и минимизировать влияние изменчивости возобновляемых источников на качество электроэнергии.

<sup>17</sup> J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, Aug. 2002

<sup>18</sup> S. Kouro et al., "Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 8, pp. 2553-2580, Aug. 2010

<sup>19</sup> Sabah, Louarem & Kebbab, F. & Houria, Salhi & Nouri, Hamou. (2022). A comparative study of maximum power point tracking techniques for a photovoltaic grid-connected system. Electrical Engineering & Electromechanics. 27-33.

<sup>20</sup> Buccella, Concettina & Cecati, Carlo & Latafat, H.. (2012). Digital Control of Power Converters—A Survey. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 8. 437 - 447