

Research of the Electric Power Conversion in Wind Turbines with the Aerodynamic Multiplication

Alekseevskiy D.G.¹, Andrienko P.D.², Nemykina O.V.²

¹Zaporizhzhya National University,

²Zaporizhzhya National Technical University,
Zaporizhzhya, Ukraine

Abstract. The paper deals with the research of busbar power losses depending on electrical equipment installation and the dynamic change of the generated power of a wind turbine with the aerodynamic multiplication. The analysis of the electricity conversion electromechanical system is carried out on the example of the first Ukrainian pilot wind turbine with the aerodynamic multiplication of the TG-1000 type. The aim of the article is analytic method creation of analysis of power relative losses in busbars of electrical equipment depend on its arrangement, as well as the research of electromagnetic processes in the electromechanical system depend on the wind flow speed at the height axis of the turbogenerators setted on the blades of the wind wheel (WW) turbine by computer modelling method. This aim achieves by the rectifiers series connection and their location changing (generator clips), which allows the DC energy transfer inside the wind turbine. The research results have showed that power losses reduce in busbars and lead to increase wind turbine efficiency and decrease cable consumption. Electromagnet processes modelling of visual block model have evidenced the adequacy of the assumptions in the determination of the power losses. It has been obtained that the wind flow speed irregularity at the height axis of the turbogenerator and steering angle between turbogenerator axis and wind wheel rotation plane provokes the power generation variances, which pulse according to wind wheel rotation speed. In addition, balanced current of the circuit has provided the symmetrizing amplitudes of the power generator.

Keywords: electromechanical system, wind turbine, aerodynamic multiplication, frequency converter, autonomous inverter, energy conversion, efficiency.

DOI: 10.5281/zenodo.2650423

Studiul schemelor de conversie a energiei electrice în instalații eoliene cu multiplicare aerodinamică

Alekseevski D.G.¹, Andrienko P.D.², Nemykina O.V.²

¹Universitatea Națională din Zaporizhia,

²Zaporizhzhya Universitatea Tehnică Națională

Rezumat. Lucrarea este dedicată studierii pierderilor de putere în conductori în funcție de amplasarea echipamentului electric și de dinamica schimbărilor în puterea generată folosind un model vizual al blocului sistemului electromecanic al unei instalații electrice eoliene cu multiplicare aerodinamică. În acest scop, a fost efectuată o analiză a conversiei energiei electrice în prima centrală eoliană experimentală eoliană cu model multiplicativ aerodinamic TG-1000 la o viteză constantă a fluxului de vânt. Scopul lucrării este de a analiza circuitele electrice de plasare a echipamentelor electrice din punctul de vedere al reducerii pierderilor de putere în conductoare prin metode analitice, precum și studiul proceselor electromagnetice într-un sistem electromecanic utilizând metoda simulării în funcție de viteza fluxului de vânt la înălțimea axei turbogeneratoarelor amplasate pe palele turbinei eoliene ale instalației. Acest obiectiv se realizează prin schimbarea amplasării redresoarelor la bornele generatoarelor și a conexiunii lor în serie, ce permite transferul energiei în interiorul centralei eoliene la curent continuu. S-a constatat că pierderile de putere în conductoarele cu curent continuu se micșorează de 4,5 ori și ca rezultat contribuie la o creștere a randamentului (eficienței) turbinei eoliene cu mai mult de 1,1% și o reducere de 2,25 ÷ 4,5 oria a consumului de cablu în instalația eoliană. Se constată, că viteza inegală a fluxului de vânt la înălțimea axei turbogeneratoarelor față de sol și unghiul de rotație al axei turbogeneratoare față de planul de rotație al turbinei eoliene conduce la generarea inegală de putere care pulsează cu frecvența de rotație a turbinei eoliene.

Cuvinte-cheie: sistem electromecanic, instalație eoliană, multiplicare aerodinamică, convertizor de frecvență, inverter autonom, conversie de energie, eficiență.

Исследование схем преобразования электроэнергии в ветроэлектрических установках с аэродинамической мультипликацией

Алексеевский Д.Г.¹, Андриенко П.Д.², Немыкина О.В.²

¹Запорожский национальный университет,

²Запорожский национальный технический университет,

Запорожье, Украина

Аннотация. Работа посвящена исследованию потерь мощности в токопроводах в зависимости от размещения электрооборудования и динамики изменения генерируемой мощности с использованием визуально-блочной модели электромеханической системы ветроэлектрической установки с аэродинамической мультипликацией. С этой целью проведен анализ преобразования электроэнергии в первой опытной украинской ветроэлектрической установке с аэродинамической мультипликацией типа ТГ-1000 при постоянной скорости ветрового потока. Целью работы является анализ электрических схем размещения электрооборудования с точки зрения снижения потерь мощности в токопроводах аналитическими методами, а также исследование электромагнитных процессов в электромеханической системе методом имитационного моделирования в зависимости от скорости ветрового потока на высоте оси турбогенераторов, расположенных на лопастях ветроколеса ветроэлектрической установки. Поставленная цель достигается изменением места расположения выпрямителей у зажимов генераторов и их последовательным соединением, что позволяет осуществлять передачу энергии внутри ветроэлектрической установки на постоянном токе. При этом установлено, что потери мощности в токопроводах постоянного тока снижаются в 4,5 раза и приводят к повышению КПД ветроустановки более чем на 1,1% и снижению расхода кабеля в 2,25÷4,5 раза. Результаты моделирования электромагнитных процессов на разработанной визуально-блочной модели показывают адекватность схем размещения оборудования. Установлено, что неравномерность скорости ветрового потока на высоте расположения осей турбогенераторов относительно земли и наличие угла разворота оси турбогенераторов относительно плоскости вращения ветроколеса приводит к неравномерной генерации мощности, которая пульсирует с частотой вращения ветроколеса, а наличие уравнивающего тока в схеме приводит к симметрированию амплитуд генерируемой мощности. При пространственном сдвиге осей турбогенераторов на 120 градусов и симметрировании генерируемой турбогенераторами мощности в выходной мощности ветроустановки отсутствуют пульсации, кратные частоте вращения ветроколеса.

Ключевые слова: электромеханическая система, ветроэлектрическая установка, аэродинамическая мультипликация, преобразователь частоты, автономный инвертор, преобразование энергии, эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на бурное развитие ветроэлектрических установок с горизонтальной осью вращения лопастей и размещением генераторов на оси ветроколеса в зарубежной и отечественной практике рассматривают возможности использования ветроэлектрических установок с аэродинамической мультипликацией (Aerodynamic Multiplication) [1-15]. Ветроэлектрические установки с аэродинамической мультипликацией (ВЭУ АМ) обладают рядом существенных преимуществ в том числе:

- отсутствие механического мультипликатора, снижающего КПД ВЭУ до 5% [15];

- значительный момент инерции ветроколеса (ВК), связанный с размещением турбогенераторов (ТГ) на лопастях ВК, что снижает пульсации генерируемой мощности.

В Украине созданы первые опытные образцы ВЭУ АМ типа ТГ-750 и ТГ-1000, которые подтверждают перспективность и

возможности их практической реализации [6,13].

Конструктивные особенности ВЭУ АМ имеют отличие в размещении ее электрооборудования по сравнению со случаями, когда основное оборудование размещено в гондоле ВЭУ либо инверторная часть расположена в офшорной зоне и передача электроэнергии происходит на высоком напряжении 10-35кВ или на постоянном токе к месту установки инверторной подстанции.

Расположенные на лопастях ВК, турбогенераторы работают при различных воздействиях вращающего момента, который зависит от высоты их оси относительно земли при вращении ВК. Эта зависимость является следствием различной скорости ветрового потока на высоте, по температуре и влажности, а также угла разворота оси ТГ относительно плоскости вращения ВК [16].

В работах [17,18] проведен ряд исследований, направленных на повышение эффективности преобразования энергии в

ВЭУ АМ за счет оптимального выбора оборотов ТГ, использования схемы с переменной структурой, генераторов повышенной частоты. Однако вопросы потерь мощности в схемах преобразования и вопросы динамики работы ВЭУ АМ в отечественной и зарубежной литературе не освещены в достаточной степени.

Для исследования особенностей работы схем преобразования и поведения всей системы в динамике, которая в ВЭУ АМ имеет достаточно сложную многоканальную взаимосвязанную структуру необходимо иметь соответствующие модели.

Существующие модели, использующие причинно-следственные связи, разработаны для конкретных электромеханических систем [21-24] не могут быть использованы для исследования ВЭУ АМ в том числе для сравнительного анализа различных схем преобразования энергии ветра от количества их каналов и электрических схем преобразования.

Исследование потерь мощности в токопроводах в зависимости от размещения оборудования ВЭУ АМ и исследования процессов преобразования электроэнергии при помощи визуально-блочной имитационной модели приобретают актуальность.

ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ТОКОПРОВОДАХ

На рис. 1 представлена функциональная схема преобразования энергии в ВЭУ АМ типа ТГ-1000. Ветроустановка имеет три ТГ мощностью 350кВт, напряжением 660В. В ВЭУ АМ турбогенераторы расположены на лопастях ветроколеса (ВК) на расстоянии 2/3 длины лопасти от оси ВК. Кольцевые токосъемники (КТ) расположены на оси ВК и силовыми кабелями 150 мм² подключены к многоканальному преобразователю частоты (МПЧ), который расположен у основания башни ВЭУ АМ. Далее через трансформатор (ТР) МПЧ связан с сетью. В состав МПЧ входят 3 выпрямителя (1В-3В) с импульсными преобразователями повышающего напряжения (ИППН-ЗИППН), емкостный фильтр (Ф) и два трехуровневых инвертора (1АИН, 2АИН).

Передача энергии осуществляется тремя каналами трехфазного переменного тока, которые имеют 9 проводников токопровода.

Фазный ток генератора, работающего на выпрямитель, благодаря наличию индуктивности ИППН имеет практически прямоугольную форму, которая помимо основной гармоники содержит нечетные гармоники $n=6k\pm 1$ порядка, где k - произвольное целое число [19].

На рис.2 представлены варианты схемы размещения выпрямителей МПЧ у зажимов ТГ, которые соединены последовательно.

Передача энергии осуществляется 4 проводниками токопровода постоянного тока. Величина передаваемого тока по основному каналу эквивалентна току в одном канале базового варианта (рис.1). Таким образом, передача энергии осуществляется меньшим количеством кабелей токопровода, что соответствует уменьшению потерь мощности в токопроводах. Для оценки потерь мощности проведено сравнение потерь мощности в токопроводах постоянного и переменного токов.

Потери мощности в одной фазе токопровода переменного тока в условиях генерации высших гармоник составляют [20]:

$$\Delta \Sigma P = \left(\Delta P_1 + \sum_{k=1}^{n=6k\pm 1} \Delta P_n \right) = \left((I_1)^2 R_{\omega 1} + \sum_{k=1}^{n=6k\pm 1} (I_n)^2 \cdot R_{\omega n} \right) \quad (1)$$

где I_1, I_n – расчетное значение тока первой и гармоник n -порядка; $R_{\omega 1}, R_{\omega n}$ – активное сопротивление токопровода переменному току для первой гармоники и гармоник n -порядка, соответственно.

Потери мощности в одном полюсе токопровода постоянного тока с учетом соотношения фазного и выпрямленного токов:

$$\Delta P_d = (I_0)^2 R_0 = \frac{3}{2} (I_1)^2 R_0 \quad (2)$$

где $I_0 = I_1 / \sqrt{2/3}$ – выпрямленный ток выпрямителя; R_0 – омическое сопротивление токопровода.

В относительных единицах соотношение потерь в жилах кабеля переменного и постоянного тока с учетом (1) и (2) имеет следующий вид:

$$\Delta P^*_{\Sigma} = \frac{\Delta \Sigma P}{\Delta P_d} = \frac{2}{3} K_{\omega l} \left[\left(\frac{1}{\cos \varphi_1} \right)^2 + \sum_{k=1}^{n=6k \pm 1} K_{\omega n} \cdot (I_n^*)^2 \right] \quad (3)$$

где $I_n^* = I_n / I_0$; $K_{\omega n} = R_{\omega n} / R_{\omega l}$; $K_{\omega l} = R_{\omega l} / R_0$; $\cos \varphi_1$ – коэффициент мощности основной (первой) гармоники.

Значение $\cos \varphi_1$ определяется углом коммутации (γ) выпрямителей. Для возможных углов коммутации $\gamma = 0 \div 30^\circ$.

$$\cos \varphi_1 \approx \cos \left(\frac{\gamma}{2} \right) = 1 \div 0,96. \quad (4)$$

Величина $K_{\omega n}$ зависит от конструкции кабеля, влияния вихревых токов и эффекта близости. Для практических расчетов значение $K_{\omega l}$ может быть найдено из соотношения допустимых значений переменного и постоянного тока исходя из

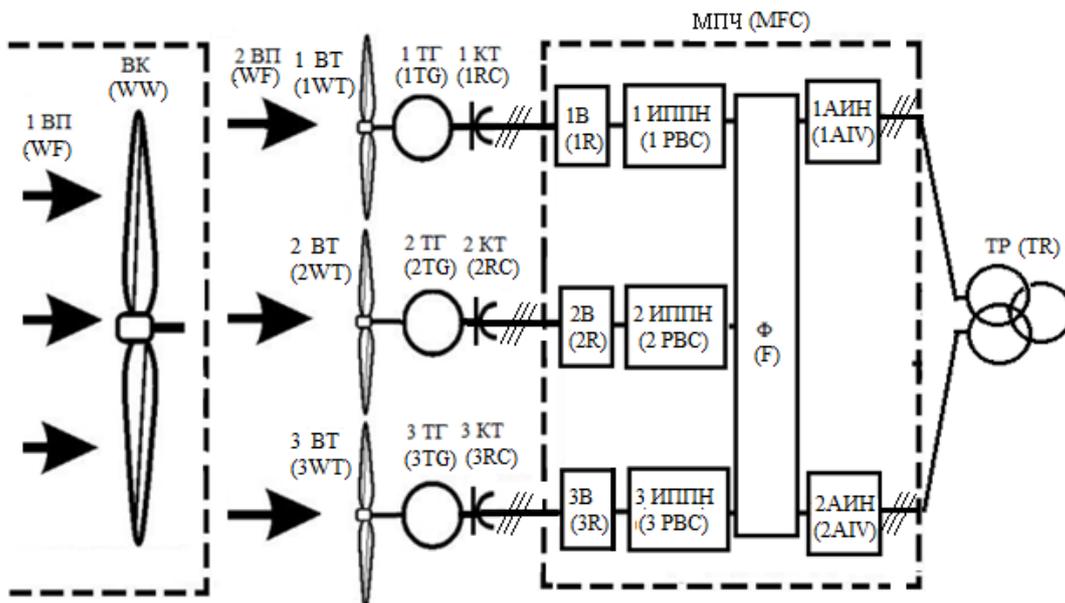
условия равенства потерь $R_{\omega l} \cdot I_{m1}^2 = R_0 I_{m0}^2$, определяющих температурный режим кабеля.

$$K_{\omega l} = \frac{R_{\omega l}}{R_0} = \left(\frac{I_{m0}}{I_{m1}} \right)^2 = \left(\frac{470}{440} \right)^2 = 1,14 \quad (5)$$

где I_{m1}, I_{m0} – максимальное значение переменного тока и выпрямленного тока.

Относительное значение токов высших гармоник обратно пропорциональны относительной частоте f_n^* , где $n=6k \pm 1$ [19]. Полагая, что относительное значение активного сопротивления токопровода для гармоник n -порядка, с достаточной для практики точностью пропорциональны $\sqrt{f_n^*} \approx K_{\omega n}$ [19], относительные потери мощности в одножильном кабеле, определяются соотношением:

$$\Delta P^*_{\Sigma} = \frac{2}{3} \cdot K_{\omega l} \left[\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} + \sum_{k=1}^{n=6k \pm 1} \frac{\sqrt{f_n^*}}{(f_n^*)^2} \right] \quad (6)$$



1 ВП, 2 ВП – ветровой поток (1WF, 2WF - wind flow); ВК – ветроколесо (WW - wind wheel); 1ВТ, 2ВТ, 3ВТ – ветротурбины, (1WT, 2WT, 3WT wind turbines); 1ТГ, 2ТГ, 3ТГ- турбогенераторы (1TG, 2TG, 3TG - turbogenerators); 1КТ, 2КТ, 3КТ - кольцевые токосъёмники (1RC, 2RC, 3RC - ring collectors); 1В, 2В, 3В – выпрямители (1R, 2R, 3R - rectifiers); 1 ИППН, 2 ИППН, 3 ИППН – импульсные преобразователи повышающего напряжения (1PBC, 2PBC, 3PBC - pulse DC/DC boost converter); Ф- фильтр (F - filter); 1АИН, 2АИН – автономные инверторы напряжения (1AIV, 2AIV - autonomous inverter voltages); ТР- трансформатор (TR - transformer); МПЧ- многоканальный преобразователь частоты (MFC- multichannel frequency converter).

Рис. 1. Функциональная схема преобразования энергии в ВЭУ АМ типа ТГ-1000. (Fig. 1. Functional scheme of energy conversion in wind turbines AM type TG-1000).

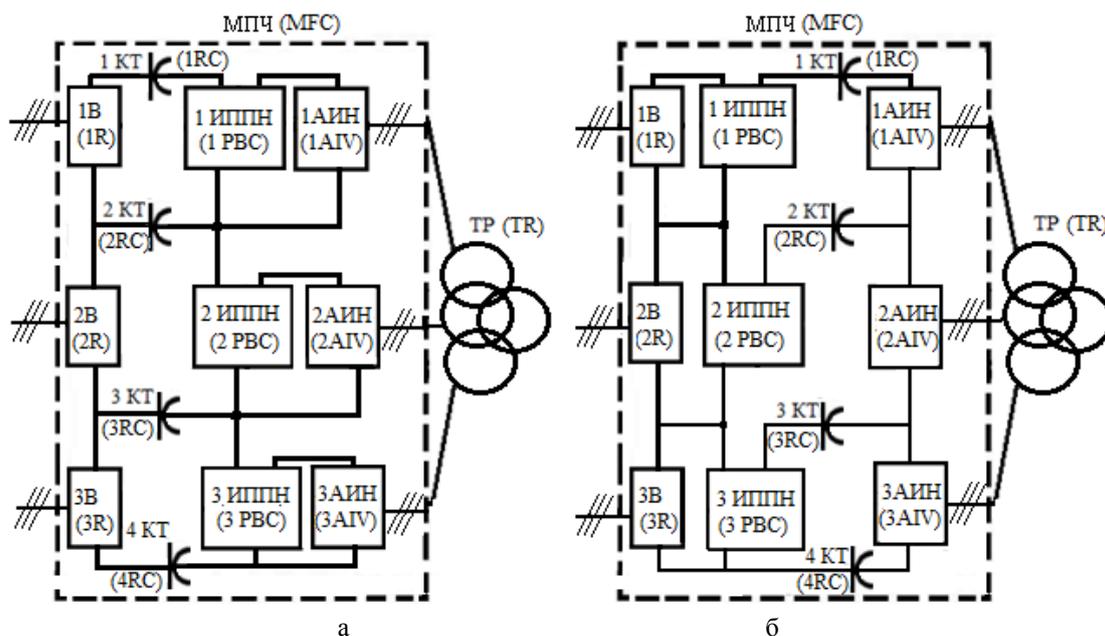


Рис.2. Функциональные схемы преобразования энергии с последовательным соединением выпрямителей ВЭУ АМ.

(Fig.2. Functional schemes of energy conversion with serial rectifiers' connection of wind turbines AM).

где $f_n^* = f_n / f_1$ – относительная частота гармоники n – порядка; f_n, f_1 – частота гармоники n – порядка, частота и основной гармоники, соответственно.

При принятых допущениях относительное значение потерь с учетом суммы ряда (б) $n \leq 40 \Delta P_{\Sigma}^* = 0,93 \div 1,015$.

Таким образом, в одножильном кабеле принятого типа при одинаковой величине активного тока выпрямителя потери мощности на переменном токе с учетом потерь от высших гармоник практически равны потерям мощности выпрямленного тока.

Суммарные относительные потери зависят от соотношения жил кабеля на переменном и постоянном токе.

Следовательно, конструкция токопроводов и размещение оборудования ВЭУ АМ при передаче электроэнергии должно обеспечивать максимальное значение этого соотношения.

Расчеты по соотношению (3) дают следующие результаты.

В базовом варианте в номинальном режиме потери мощности в токопроводах переменного тока при номинальной мощности составляют 15,6 кВт, что снижает КПД ВЭУ АМ на 1,56%. При ветровых потоках менее 5 м/с потери мощности

снижаются до 7,3 кВт, что уменьшает КПД на 2,5%.

Использование схемы (рис. 2а) позволяет снизить расход кабелей в 2,25 раза (225 м) и снизить потери примерно в 4,5 раза, поскольку основной генерируемый ток проходит по двум крайним кабелям (1КТ и 4КТ), а по двум кабелям (2КТ и 3КТ) протекает уравнивающий ток, модулированный частотой вращения ВК с амплитудой не более 5,5А (рис.б.). За счет снижения потерь в токопроводах КПД ВЭУ АМ возрастает на 1,1% в номинальном режиме и более чем 4,9% при малых ветровых потоках. Использование в схемах (рис. 2 а, б) трех двухуровневых инверторов меньшей мощности вместо двух трехуровневых существенно не влияет на изменение цен МПЧ, улучшая при этом электромагнитную совместимость.

На рис. 3 представлена схема с использованием активных выпрямителей (АВ), что позволяет снизить расход кабеля по сравнению с базовым вариантом в 4,5 раза (≈ 450 м) и снижения потерь за счет исключения потерь в импульсном преобразователе и от уравнивающих токов.

Схема позволяет реализовать многофазное инвертирование и обеспечить электромагнитную совместимость ВЭУ АМ с сетью, возможность реализации

резервирования и, следовательно, надежности схемы.

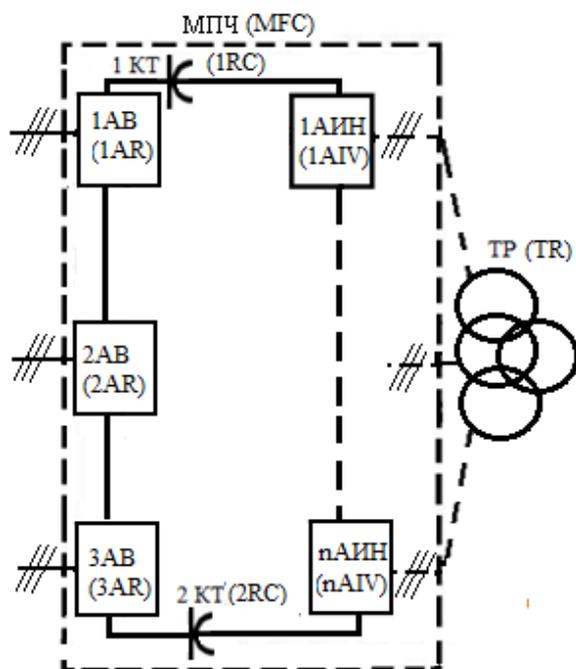


Рис.3. Функциональная схема преобразования энергии с последовательным соединением активных выпрямителей ВЭУ АМ.

(Fig.3. Functional scheme of the energy conversion with serial active rectifiers' connection of the wind turbine AM).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ МУЛЬТИПЛИКАЦИЕЙ

Для исследования электромеханических процессов ВЭУ АМ типа ТГ-1000 в работе была использована ее визуально-блочная модель (ВБМ), которая представлена на рис.4. ВБМ является развитием подхода к синтезу визуальных моделей многоканальных ветроэнергетических систем с аэродинамическим мультиплицированием [25,26]. Модель реализуется в среде Matlab/Simulink. Структура модели представляет электромеханическую систему ВЭУ АМ, как тракт преобразования мощности.

Каждый элемент ВБМ является стандартным блоком, взятым из библиотеки компонентов и отражает определенную энергетическую функцию: преобразования, накопления или распределения энергии внутри электромеханической системы. Данный подход к построению модели

позволяет представить математическую модель в едином базисе, в котором связи между элементами соответствуют причинно-следственным связям, и полностью абстрагированы от их физической природы.

С точки зрения структуры преобразования мощности ВЭУ АМ представляет собой многоканальный энергетический тракт. Разделение потоков мощности происходит на уровне первичного воздушного потока, за счет небольшого разворота вторичных ветротурбин (ВТ) относительно плоскости, вращения первичной ВТ, а также на уровне вторичного воздушного потока, где механическая энергия вращения первичной ВТ распределяется между тремя вторичными ВТ. Далее энергия подвергается преобразованию в трех параллельных трактах, которые включают в себя: вторичную ВТ, генератор, неуправляемый выпрямитель, ИППН, АИН и соответствующие емкостные и индуктивные фильтры. Консолидация же потоков мощности, в рассмотренной схеме, происходит на уровне сети.

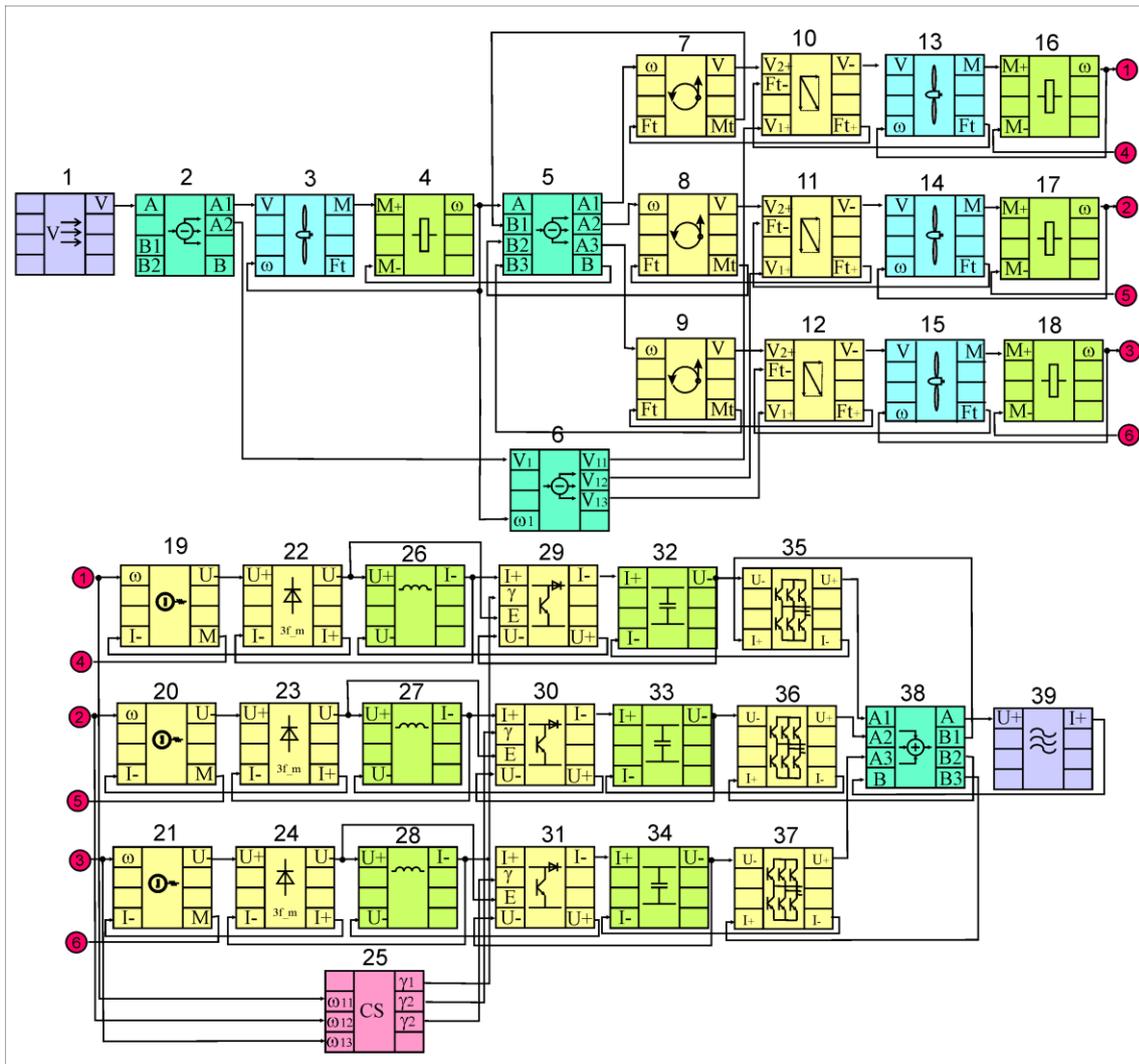
С помощью рассмотренной модели были проведены исследования влияния динамики работы ВЭУ на величину средних значений токов во втором (2КТ) и третьем (3КТ) токосъемных узлах.

При идентичности электромеханических процессов в трех каналах преобразования мощности, в этих узлах системы токи вообще отсутствуют. Однако, в реальной системе, это условие не выполняется.

Причиной этого является то, что вследствие небольшого разворота осей вторичных ВТ относительно плоскости вращения первичной ВТ, вторичные ВТ взаимодействуют не только с вторичным воздушным потоком, но и с первичным ветром.

При этом его скорость существенно различается на разных высотах. В результате этого мощности на валу генераторов в любой текущий момент времени различаются.

Следствием этого является появление некомпенсированных токов во втором (2КТ) и третьем (3КТ) токосъемных узлах (рис.5). На рис.5 представлены осциллограммы токов через токосъемники 1КТ и 4КТ (I_1, I_4) и 2КТ и 3КТ (I_2, I_3), и выходной мощности ТГ (P_1, P_2, P_3).



1 – первичный воздушный поток (primary air flow); 2 - распределитель мощности первичного воздушного потока между первичной и вторичными ветротурбинами (power distributor of the primary air flow between the primary and secondary type wind turbines); 3 – первичная ветротурбина (primary type wind turbine); 4 – вращающиеся массы на валу первичной ветротурбины (rotating masses of the shaft of the primary type wind turbine); 5 - распределитель мощности первичной ветротурбины между вторичными (power distributor of the primary type wind turbine between the secondary ones); 6 - распределитель потока мощности первичного ветрового потока между вторичными ветротурбинами (power distributor of primary type wind flow between secondary type wind turbines); 7, 8, 9 – преобразователи энергии вращательного движения в энергию поступательного (rotary motion energy converters to translation energy); 10, 11, 12 – блоки модели, суммирующие мощность первичного и вторичного воздушного потока, при развороте осей вторичных ветротурбин (model blocks that summarize the power of the primary and secondary air flows taking into account the axes of secondary type wind turbines is steered); 13, 14, 15 – вторичные ветротурбины (secondary type wind turbines); 16, 17, 18 – вращающиеся массы на валу первичной ветротурбины (rotating masses of the shaft of primary type wind turbine); 19, 20, 21 – синхронные генераторы (synchronous generators); 22, 23, 24 – трехфазные неуправляемые мостовые выпрямители (three-phase uncontrolled bridge-type rectifiers); 25 – система управления скоростью генераторов (generator speed control system); 26, 27, 28 – индуктивные фильтры (inductive filters); 29, 30, 31 – импульсные преобразователи постоянного напряжения повышающего типа (pulse DC/DC boost converter); 32, 33, 34 – емкостные фильтры (capacitry filters); 35, 36, 37 – автономные инверторы напряжения (autonomous voltage inverter); 38 – блоки модели, объединяющие мощность трех каналов в один поток (model block that join the three power channels); 39 – электрическая сеть (power supply network).

**Рис.4. Визуально-блочная модель электромеханической системы ВЭУ АМ.
(Fig.4. Visual-block model electromechanical system of the wind turbine AM).**

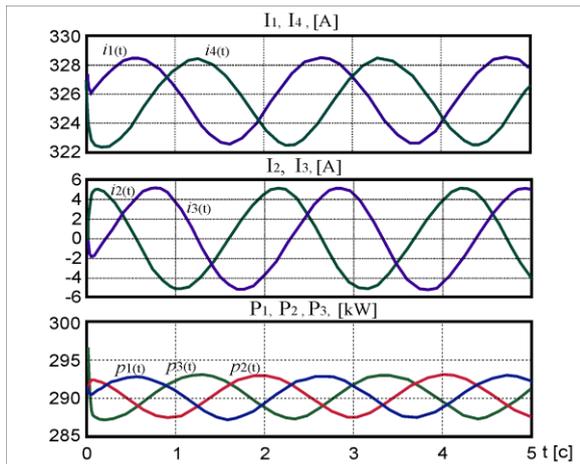


Рис.5. Осциллограммы токов и мощности, ВЭУ АМ в установившемся режиме. (Fig.5. Currents and power oscillograms for the wind turbine AM at the steady state).

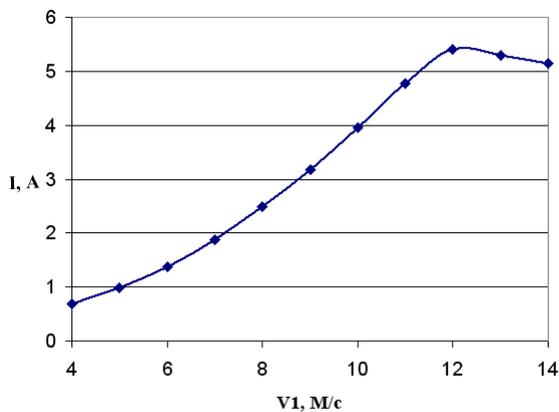


Рис.6. Зависимость величины токов в токосъемных узлах 2КТ и 3КТ от средней скорости ветрового потока на высоте оси ВК. (Fig.6. The dependence of the currents' magnitude in the collector nodes 2КТ and 3КТ from the average speed of the wind flow at the height of the axis wind wheel).

На осциллограммах видны пульсации мощности ТГ в каждом канале и результирующего (уравнительного тока) в токопроводах 2КТ и 3КТ с частотой вращения ВК. Наличие уравнительного тока между каналами приводит к симметрированию мощностей каждого ТГ.

Сдвиг фаз на 1/3 периода при равенстве амплитуд пульсаций мощности ТГ обеспечивает постоянство суммарной генерируемой мощности при постоянстве скорости ветрового потока ВК.

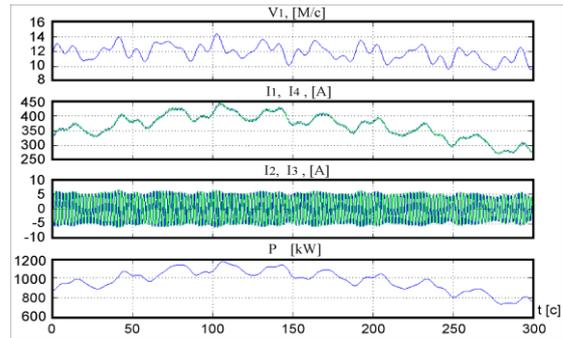


Рис. 7. Осциллограммы скорости, токов через токосъемные узлы и выходной мощности ВЭУ с АМ при переменной скорости ветрового потока. (Fig. 7. Oscillograms of speed, currents through collector units and output power of wind turbines with AM at a variable speed of wind flow).

На рис.6 представлена зависимость величины токов в токосъемных узлах 2КТ и 3КТ от средней скорости ветрового потока на высоте оси ВК. Спад характеристики связан с падением генерируемой мощности при скорости ВП выше номинальной (12 м/с). Результаты моделирования подтверждают принятые ранее допущения о незначительном влиянии уравнительного тока на потери мощности токопроводах 2КТ и 3КТ.

На рис. 7 приведены результаты моделирования токов через токосъемные узлы ВЭУ с АМ в условиях динамического изменения скорости ветрового потока.

Результаты моделирования подтверждают вывод, что характер зависимости, приведенной на рис. 6 сохраняется и в условиях электромеханического переходного процесса.

ВЫВОДЫ.

1. Получено аналитическое соотношение, позволяющее оценить относительные потери мощности в токопроводах постоянного и переменного токов в ВЭУ АМ.

2. Конструктивное изменение расположения электрооборудования для реализации передачи электроэнергии на постоянном токе позволяет:

- снизить потери мощности в токопроводах постоянного тока в 4,5 раза по сравнению с переменным и повысить КПД на 1,1÷4,9 % в зависимости от режима работы ВЭУ АМ и варианта размещения электрооборудования;

- снизить расход в 2,25÷4,5 раза кабельной продукции;

-упростить конструкцию кольцевых токоёмников, и, следовательно, снизить себестоимость ВЭУ АМ и повысить энергоэффективность ВЭУ АМ.

3.Разработанная визуально-блочная модель электромеханической системы ВЭУ АМ позволяет исследовать сложные структуры, присущие для рассматриваемых систем.

4. Методом моделирования установлено, что наличие уравнивающего тока, вызванного несимметричным воздушным потоком на уровне осей ТГ способствует симметрированию их генерируемых мощностей и поддержанию постоянства выходной мощности.

Литература (References)

[1] Madsen H. A., Rasmussen F. Wind turbine having secondary rotors. Patent EP, no. EP1390615, 2008.

[2] Hutter U. Wind-driven power plant. Patent US, no. US 4197056, 1980.

[3] William K. Watson. Space frame wind turbine. Patent US, no. US4735552, 1988.

[4] St-Germain J. Wind machine with electric generators and secondary rotors located on rotating vertical blades. Patent US, no. US5151610, 1992.

[5] Madsen H. A., Flemming R. Wind turbine having secondary rotors. Patent WO, no. WO2002086312, 2002.

[6] M.S. Golubenko, S.I. Dovgolyuk, A.L. Kadatskiy, S.D. Kurdyukov, A.M. Feldman, V.A. Tsygnaov. Wind power plant. Patent UA, no. EP2045463, 2009.

[7] Jamieson P. Innovation in wind turbine design // John Wiley & Sons, Ltd, 2011. — 299 p.

[8] Arifujjaman, M. Power Electronics Reliability Comparison of Grid Connected Small Wind Energy Conversion Systems. Wind Engineering Volume 35, NO. 1, 2011.

[9] Feldman Alexander. Vertical axis sail bladed wind turbine. Patent US, no. US5171127A, 1992.

[10] William E. Heronemus. VERTICAL ARRAY WIND TURBINE. Patent US, no. US006749399B2, 2004.

[11] Klippe F. Van D. Wind energy conversion device. Patent NL, no. NL1013380C2, 2001.

[12] Todman M. T., Carew Armstrong J. R.. Multi rotor wind turbine. Patent GB, no. GB2443886A, 2008.

[13] Golubenko N. S., Dovgalyuk S. M., Feldman A. M., Tsyganov V. A. [Trends in the development of wind energy and non-multiplicative wind

installations]. *Trudy DVNS «Netraditsionnaya energetika XXI veka»* [Proc. of the IV International Conference ["Alternative Energy of the 21st Century"]. - Crimea, Gurzuf. - 2003. - pp. 68–74. (In Russian).

- [14] Tsgoev R.S. Matematicheskoe modelirovanie aerodinamicheskikh harakteristik vetrokolesa [Mathematical modeling of wind wheel aerodynamic characteristics]. *Elektrotehnika Electrical Engineering*, 2009. - no.11, pp. 47-52. (In Russian).
- [15] Tsgoev, R. S. Sravneniye rezhimnykh vozmozhnostey vetroenergeticheskikh ustanovok [Comparison of wind power facilities]. *Elektrotehnika - Electrical engineering*, 2007, no.12, pp. 32–38. (In Russian).
- [16] Baring-Gould and D. Corbus Status of Wind-Diesel Applications in Arctic Climates The Arctic Energy Summit Technology Conference Anchorage, Alaska October 15–18, 2007.- pp. 3–7.
- [17] Nemudry I.Yu. Povyishenie effektivnosti preobrazovaniya energii v VEU s aerodinamicheskoy multiplikatsiyey [Improvment the efficiency of energy conversion in wind turbines with aerodynamic multiplication]. *Elektrotehnika ta elektroenergetika –Electrical engineering and power engineering.–* 2014, no.1. – pp. 79-85. (In Russian).
- [18] Golubenko N.S., Andrienko P.D, Nemudryy I.Yu. Modelirovanie elektromehanicheskoy sistemy VEU s aerodinamicheskoy multiplikatsiyey v rezhime stabilizatsii skorosti vrascheniya vetroturbin [Modeling of an electromechanical system of a wind turbine with aerodynamic multiplication in the operation of stabilization of speed and rotation of wind turbines]. *Elektrotehnika ta elektroenergetika – Electrical engineering and power engineering.–* 2011. – no1, pp.. 70-74. (In Russian).
- [19] Makarov E.F *Spravochnik po elektricheskim setyam 0,4–35 kV i 110–1150 kV:T.4* [Handbook of electric networks 0.4-35 kV and 110-1150 kV: T.4/pod red. I. T. Goryunova i A. A. Lyubimova] / ed. I.T. Goryunova and A.A. Lyubimov. – Moscow Papyrus PRO Publ., 2005. 637 p. (In Russian).
- [20] Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva i ih kontrol na promyishlennykh predpriyatiyah* [Quality Indicators and Their Control at Industrial Enterprises] Moscow, Energoatom. Publ., 2000. 252 p. (In Russian).
- [21] Leclercq A., Sicard P., Bouscayrol A., Lemaire-Semail B., "Control of a triple drive paper system based on the Energetic Macroscopic Representation" Ajacci, IEEE-ISIE'04. Publ., 2004, pp. 889-893.
- [22] Wankam D., Sicard P., Bouscayrol A. "Maximum control structure of a five-drive paper system using Energetic Macroscopic

- Representation," [Proc. of the Special Session Graphical Description for Modeling and Control Power Systems] Paris, IEEE IECOM Publ., 2006, pp.5332-5337.
- [23] Chen K., Bouscayrol A., Lhomme W., "Energetic Macroscopic Representation and Inversion-based control: Application to an Electric Vehicle with an electrical differential", Journal of Asian Electric Vehicles, Vol. 6, no.1, June, Osaka, Publ., 2008, pp. 1097-1102.
- [24] Bouscayrol A., Hautier J. P., Lemaire-Semail B., "Graphic Formalisms for the Control of Multi-Physical Energetic Systems", [Systemic Design Methodologies for Electrical Energy, tom 1, Analysis, Synthesis and Management] Ajacci, ISTE, Publ., 2012, pp. 535-546
- [25] Alekseevskiy D., Pankova O., Khrestin R., "Procedure for the synthesis of models of electro-technical complexes"// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, – 2018, no. 6/9(96), pp. 48-54.
- [26] Alekseevskiy D. Vizualnoe modelirovanie mnogokanalnykh vetroelektrogeneriruyushchikh sistem. [Visual modeling of multichannel wind power generating systems]. Visnik natsionalnogo tehnicnogo universitetu "Harkivskiy politehnicnyi Institut". - Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". – 2017, no.27(1249), pp. 332-336. (In Russian).

Сведения об авторах.



Алексеевский Дмитрий Геннадиевич – к.т.н, доцент, доцент каф. электронных систем инженерного института Запорожского национального университета, Украина. Область научных интересов связана с электромеханическими системами ветроэнергетических установок. E-mail: lasian2017@ukr.net



Андрienко Петр Дмитриевич – д.т.н., профессор, зав. каф. электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Украина. Область научных интересов связана с силовыми полупроводниковыми преобразователями. E-mail: andrpd@ukr.net



Немыкина Ольга Владимировна – к. т. н., доцент каф. электроснабжения промышленных предприятий Запорожского национального технического университета, Украина. Область научных интересов связана с альтернативными источниками энергии. E-mail: olganemikina@ukr.net