

УДК 621.311.24: 621.3.026.5

ОБОСНОВАНИЕ ПЕРИОДА КВАНТОВАНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ СТОХАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ И ГЕНЕРИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Физико-технический институт, Симферополь, ул. Киевская, 181, e-mail: Bekirov.e.a@cfuv.ru

Аннотация. В статье приводится график измерения реактивной мощности на Мирновской ветроэлектростанции с периодом квантования 1 с и временем измерения 0,2 с. Выбор периода квантования обосновывается с помощью теоремы Котельникова. Измерения одного и того же параметра выполнялись синхронно цифровым мультиметром с периодом отсчетов 1 с и комплектом в составе измерительного преобразователя и цифрового осциллографа PCS500 с периодом отсчетов 0,1 с. При этом учитывался интервал осреднения скорости ветра. Приведена схема измерений для данного случая, предусматривающая передачу информации на персональный компьютер. Оценены погрешности измерений стохастически изменяющихся электрических параметров ветроэнергетической установки. Показаны варианты схем организации передачи данных системы мониторинга для ветроэлектростанции в целом.

Предмет исследования: ветроэлектростанция. Исследование направлено на решение проблемы, связанной с точностью проведения измерений реактивной мощности из-за стохастического характера ее генерации и потребления, и передачей данных от ряда ветроэлектроустановок, входящих в состав ветроэлектростанции.

Материалы и методы: Применялись как аналитические, так и расчетные методы, основанные на использовании теоремы Котельникова, а также экспериментальные методы.

Результаты: Установлено, что выбранный период квантования в 1 с обеспечивает четкую и корректную картину изменения параметров генерированной энергии ветроэнергетической установкой.

Выводы: Исследования показали корректность используемой методики определения реактивной мощности для стохастического процесса генерации и потребления на ветроэлектростанции путем отдельного измерения тока и напряжения, а также при передаче данных с использованием радиомодема или сотовой связи. Данная методика и схемы могут быть использованы на других объектах энергетики.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, ветроэлектростанция, реактивная мощность, квантование, осциллограмма, модем, контроллер.

ВВЕДЕНИЕ

Работа ветроэнергетических установок (ВЭУ) зависит не только от величины скорости и направления ветра, но и от характера изменения ветрового потока. В реальных условиях процессы генерации и потребления являются стохастическими, поэтому измеренные значения реактивной мощности, например, всегда будут указаны с ошибкой. Величина этой ошибки будет зависеть от выбранного периода квантования при измерении и передаче сигнала. Следует отметить, что необходимо также учитывать частоту дискретизации и время проведения измерений.

В связи с этим целью исследования является: обосновать правильность выбора периода квантования при измерении реактивной мощности. Для этого необходимо определить погрешности стохастически изменяющихся параметров. Также задачей является: отобразить схемы измерения и передачи данных от всех ВЭУ, входящих в состав ветроэлектростанции (ВЭС) к персональному компьютеру (ПК), используемому в диспетчерском пункте для контроля и управления работой ВЭС.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Достаточно большое количество исследований в области ветроэнергетики посвящены прогнозированию и измерениям скорости и направления ветра [1 – 5], прогнозированию генерации одной ВЭУ или ВЭС в целом [6]. Причем измерения могут проводиться сразу на высоте расположения ветротурбины, для чего устанавливаются мачты с анемометрами [7, 8], или на уровне земли. Во втором случае для определения актуальных значений используется формула Хеллмана [9].

Для большой группы ВЭУ используются асинхронные генераторы [10], вследствие чего необходимо учитывать, что в процессе их работы как потребляется, так и генерируется реактивная мощность [11, 12]. Для управления режимом изменения реактивной мощности могут использоваться специальные контроллеры [13], статистические тиристорные компенсаторы или параллельно включаемые емкости [14, 15].

Но для того чтобы проводить регулирование, в первую очередь, необходимы измерения. Описание методов, используемых в сетях напряжением 0,4 кВ можно найти в работе [16]. При небольшом числе гармоник для синусоидального сигнала можно использовать, например, преобразователь Герцеля [17].

Любые измерения будут содержать погрешности, которые могут состоять из нескольких составляющих. Одна из этих составляющих будет связана с квантованием [18], другая – с рассогласованием при получении данных о напряжении и токе и, как следствие, появлением дополнительного фазового сдвига [19].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Используются экспериментальные методы исследований и теорема Котельникова для анализа результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

При проведении экспериментальных исследований стохастических процессов потребления и генерирования реактивной мощности промышленной ВЭС с асинхронными генераторами, которые зависят от порывов ветра, необходимо задать период дискретизации (квантования) входного сигнала при считывании результатов измерений. Необходимость квантования при измерении непрерывной стохастической величины (реактивной мощности), приводит к появлению методической погрешности, так как квантование по времени предполагает представление непрерывной функции $x(t)$ в виде

дискретного набора значений $x(t_i)$ и, затем, ее восстановление. Как правило, приближающую функцию, аппроксимирующую временной ряд полученного набора значений по всей его длине, невозможно описать аналитически. Поэтому одним из способов восстановления непрерывной функции является выбор достаточно малого периода квантования $\Delta t = t_i - t_{i+1}$ и соединение полученных точек отрезками или сглаживающей линией. С уменьшением периода квантования уменьшается и методическая погрешность.

Определяя период квантования необходимо учитывать, что любой цифровой прибор имеет быстродействие вычисления измеряемых параметров и период регистрации. На рис. 1 показана реальная функция изменения реактивной мощности на шинах ВЭМ ТП-6 Мирновской ВЭС, записанная электронным осциллографом "Velleman" в режиме самописца. Длительность интервала записи составляет 5 с, а частота дискретизации равна 0,1 с. На рис. 1 показаны импульсы, соответствующие регистрации этой функции с периодом квантования в 1 с и временем вычисления измеряемой величины равному 0,2 с. Середины вершин этих импульсов соединены отрезками. Отклонение этих отрезков (Δq) от реальной функции реактивной мощности представляет собой методическую погрешность.

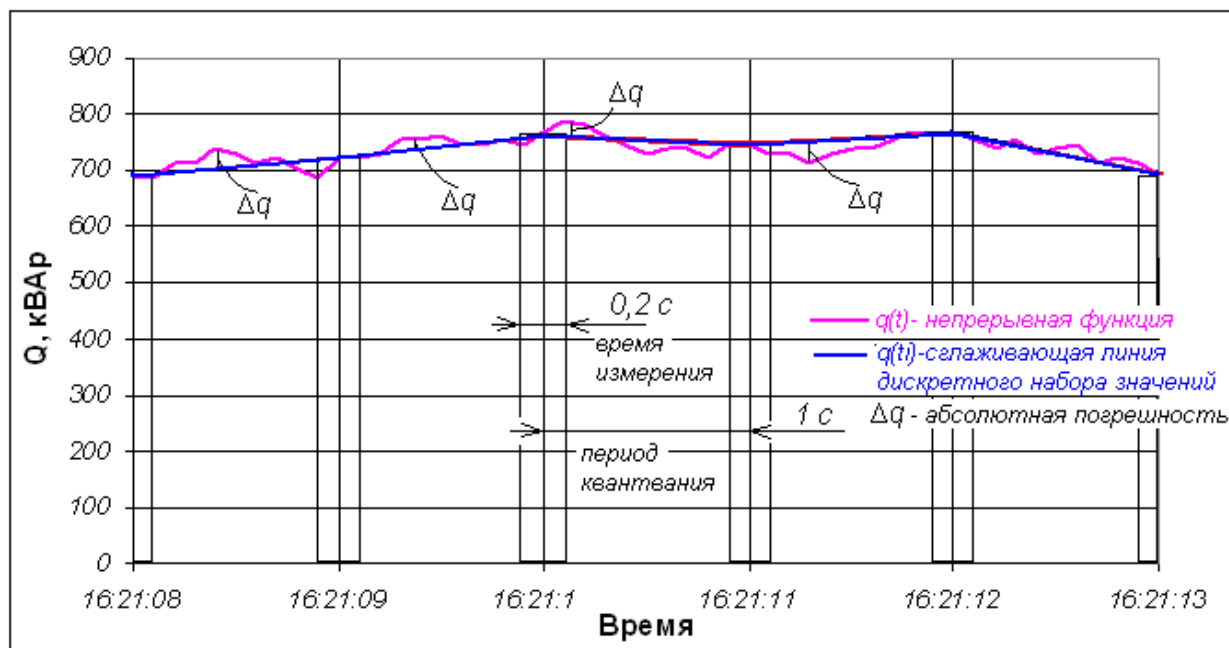


Рис. 1. Иллюстрация процесса измерения и регистрации реактивной мощности на ВЭМ ТП-6 с периодом квантования 1 с

Fig. 1. Illustration of the process of measuring and registration of reactive power on the transformer substation-6 wind energy module with the quantization period 1 second

Имея непрерывную стохастическую функцию изменения реактивной мощности, определяем период квантования по времени, при котором

методическая погрешность (отклонение между исходной и восстановленной функцией) не превышала бы значения 5%.

В литературе для определения периода квантования рекомендуется использовать теорему Котельникова. Согласно сути теоремы непрерывный сигнал $x(t)$ с ограниченным Фурье-спектром максимальной частотой F_{max} , может быть восстановлен по эквидистантной выборке значений координаты сигнала по формуле:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ x \left(\frac{n}{F_D} \right) \frac{\sin \pi (F_D t - n)}{\pi (F_D t - n)} \right\}, \quad (1)$$

где для частоты дискретизации F_D сигнала должно выполняться условие Найквиста $F_D > 2F_{max}$.

В нашем случае воспользоваться в точности теоремой Котельникова мы не можем, так как нельзя определить граничные параметры порывов ветра. Однако можно выполнить оценку периода квантования, воспользовавшись данными работы и сутью теоремы Котельникова. Так как среднее значение длительности период пульсации ветра находится в диапазоне от 3 до 6 с, то в соответствии со смыслом теоремы Котельникова период квантования должен быть менее 1,5 – 3 с. Минимальный период квантования, составляет 1 с, что удовлетворяет оценочной величине

полученного периода квантования. Однако необходимо провести оценку погрешности измерений мгновенных значений при выбранном периоде квантования. При оценке погрешности также необходимо учитывать, что вычисление измеренных параметров одного отсчета мультиметром занимает некоторое время (рис.1). Эта особенность влияет на величину погрешности.

Определение погрешности измерения реактивной мощности с периодом квантования 1 с осуществлялось экспериментальным путём. В процессе эксперимента выполнялись синхронные измерения одного и того же параметра цифровым мультиметром с периодом отсчётов 1 с и комплектом в составе измерительного преобразователя и цифрового осциллографа PCS500 с периодом отсчётов 0,1 с. Длительность одного сеанса измерений составляла 10 минут, что соответствует требуемому значению интервала осреднения скорости ветра. Результаты синхронных измерений накапливались в ПК. Схема измерений тока одной фазы ветроэлектрического модуля на базе ТП-11 показана на рисунке 2, а результаты измерений – на рисунке 3.

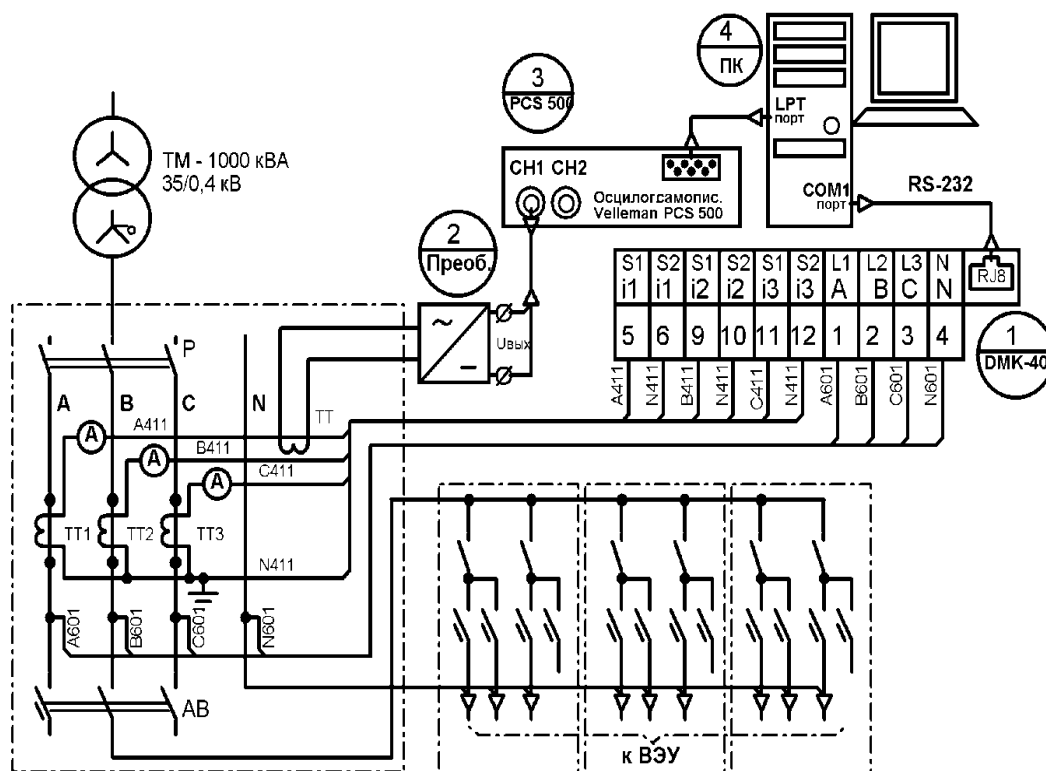
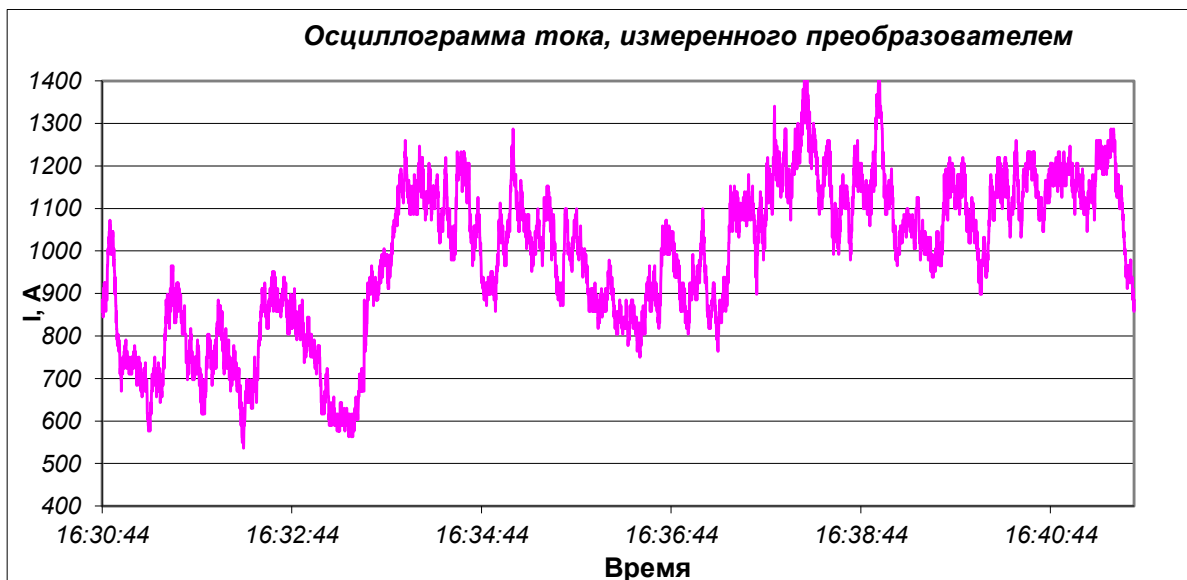


Рис. 2. Схема синхронных измерений тока ветроэлектрического модуля ТП-11 мультиметром DMK-40 с периодом квантования 1 с и комплектом в составе преобразователя переменного тока и осциллографа "Velleman" PCS-500 в режиме самописца с периодом квантования 0,1 с

Fig. 2. Synchronous measurements of the current of the transformer substation-11 wind energy module by the DMK-40 multimeter with a quantization period of 1 second and a set as part of a variable current and oscilloscope "Velleman" PCS-500 in a display mode with a quantization period of 0.1 second



а)



б)

Рис. 3. Осциллограммы измерений мгновенных значений тока: а) с периодичностью 1 с мультиметром DMK-40; б) с периодичностью 0,1 с измерительным преобразователем переменного тока и осциллографом "Velleman" PCS-500 в режиме самописца

Fig. 3. Oscillograms of measurement of instantaneous current values: а) with a frequency of 1 second by multimeter DMK-40; б) with a frequency of 0.1 second with a measuring transducer of alternating current and oscilloscope "Velleman" PCS-500 in a recorder mode

Полученные осциллограммы свидетельствуют, что выбранный период квантования в 1 с обеспечивает чёткую и корректную картину изменения параметров генерированной энергии ВЭУ. Получение количественной оценки погрешности измерений было выполнено в соответствии с рекомендациями по формулам:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

$$S(\bar{A}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{A})^2 / \{n \cdot (n - 1)\}},$$

$$\varepsilon = \pm t \cdot S(\bar{A}),$$

$$\theta = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2},$$

$$\Delta = \sqrt{\varepsilon^2 + \theta^2},$$

(2)

где $\bar{A}$ – результат измерения (среднее арифметическое значение исправленных результатов наблюдений);

n – количество значений измерений;

x_i – значение i -го измерения;

$S(\bar{A})$ – среднее квадратическое отклонение результата измерения;

ε – доверительные границы случайной погрешности результатов измерений;

t – коэффициент Стьюдента, который в зависимости от доверительной вероятности P и

числа результатов измерений n находят по таблицам;

Θ – систематическая погрешность результатов измерений;

Θ_i – i -я систематическая погрешность;

k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью ($k = 1,1$ при доверительной вероятности $P=0,95$);

Δ – суммированная погрешность.

Результаты вычисления погрешности измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты вычисления погрешности измерений стохастически изменяющихся электрических параметров ВЭУ с периодом квантования 1 с

Table 1. The results of the calculation of the measurement error of stochastic changes at the wind turbine with a quantization period 1 second

Результат измерений, о.е.	Результат измерений с учетом приведенной погрешности γ при $P=0,95$, о.е.	Оценка среднего квадратич. отклонения результата измерения $S(\bar{A})$, о.е.	Суммированная погрешность Δ с учетом погрешности преобразования при $P=0,95$, о.е.	Суммированная погрешность Δ , при $P=0,95$, о.е.	Случайная погрешность ε , о.е.	Систематическая погрешность Θ , о.е.
0,025826	$0,025826 \pm 0,005578$	$2,052 \cdot 10^{-3}$	$5,578 \cdot 10^{-3}$	$3,288 \cdot 10^{-3}$	$1,324 \cdot 10^{-3}$	$3,01 \cdot 10^{-3}$

Полученная приведенная погрешность измерения параметров электроэнергии ВЭУ с периодом квантования 1 с не превышает граничных значений точности, принятых для данного исследования (5%). Поэтому значение периода квантования в 1 с было взято за основу при разработке и создании измерительного комплекса для проведения экспериментальных исследований стохастических процессов генерирования и потребления реактивной мощности ВЭС.

Одной из разновидностей этого варианта есть полностью автономное функционирование мультиметра на отдельных узлах ВЭС, поскольку в мультиметрах ДМК40 предусмотрена программная установка активации-деактивации режима записи в архив по установленным пороговым значениям соответствующих параметров. Для периодического считывания архивов используется или портативный ПК, или специализированный логгер. Достоинством такого применения прибора является то, что он может использоваться на отдаленных точках ВЭС, куда не проложены линии связи и то, что моменты активации-деактивации режима записи в архив детерминированы.

Сформулированные выше основные положения создания системы мониторинга реализованы на Мирновской ВЭС. Фрагменты схемы соединений показаны на рисунке 4. На пульте управления персональный компьютер (ПК-1) служит системным контроллером сбора данных. Последовательный порт ПК-1 через

преобразователь интерфейса и систему кроссов (КС) витыми парами жил кабелей соединен с мультиметрами типов ДМК 62 и ДМК 40. Мультиметры установлены и присоединены в характерных точках ВЭС.

Ветроэнергетические установки промышленных ВЭС могут находиться на больших расстояниях (до 5 – 7-ми километров) от пункта управления. При этом характеристики штатных линий связи могут не обеспечивать необходимую для функционирования системы мониторинга скорость обмена данными, а к самым отдаленным ВЭУ линии связи могут и не доходить. В этом случае одним из вариантов измерений может быть применение автономной работы мультиметра ДМК40 с энергонезависимой памятью и считывания архива данных через ноутбук ПК-2 непосредственно с самого мультиметра. Другим вариантом решения этой задачи может быть объединение группы отдаленных от центра сбора данных, однако близко расположенных одна от другой ВЭУ локальной линией интерфейса RS 485, а обмен данными с центром сбора данных можно осуществлять через радиомодем с соответствующим выходным интерфейсом, например SST-900EXT. На рисунке 5 представлена функциональная схема организации такого обмена. На удаленных объектах ВЭС модули сбора данных – МЗД1- МЗДк соединены локальной линией интерфейса RS-485. Каждому из модулей сбора данных всей системы установлены индивидуальные адреса. Линии интерфейса

замыкаются на радиомодем РМ(S), который в этой конфигурации системы выполняет роль ведомого (Slave), то есть трансформирует и передает потоки данных, генерированных модулями сбора данных и системным контроллером системы, каким есть персональный компьютер - ПК СМПЕЕ. ПК осуществляет связь и проводит сеансы обмена данными с МЗД через аналогичный радиомодем РМ(M), который выполняет функции ведущего (Master). Для этого в ПК должен быть введен отдельный порт связи (для радиомодемов SST-900EXT). Обмен данными ПК с абонентами системы по проводным линиям связи осуществляется с другого порта ПК через соответствующий формирователь Ф485 сигналов

интерфейса. Программное обеспечение системы в этом случае должно обеспечивать режим мультипортового приема данных. В указанных выше радиомодемах предусмотрен многоканальный обмен данными, что дает возможность реализовать максимум 8 аналогичных подсистем обмена (соответственно с вдвое большим числом необходимых для этого модемов). Связь с отдаленными модулями через радиомодем позволяет не только обойтись без длинных линий связи, но и передавать данные при максимально возможных скоростях обмена, что существенно увеличивает реальную информационную продуктивность всей системы мониторинга.

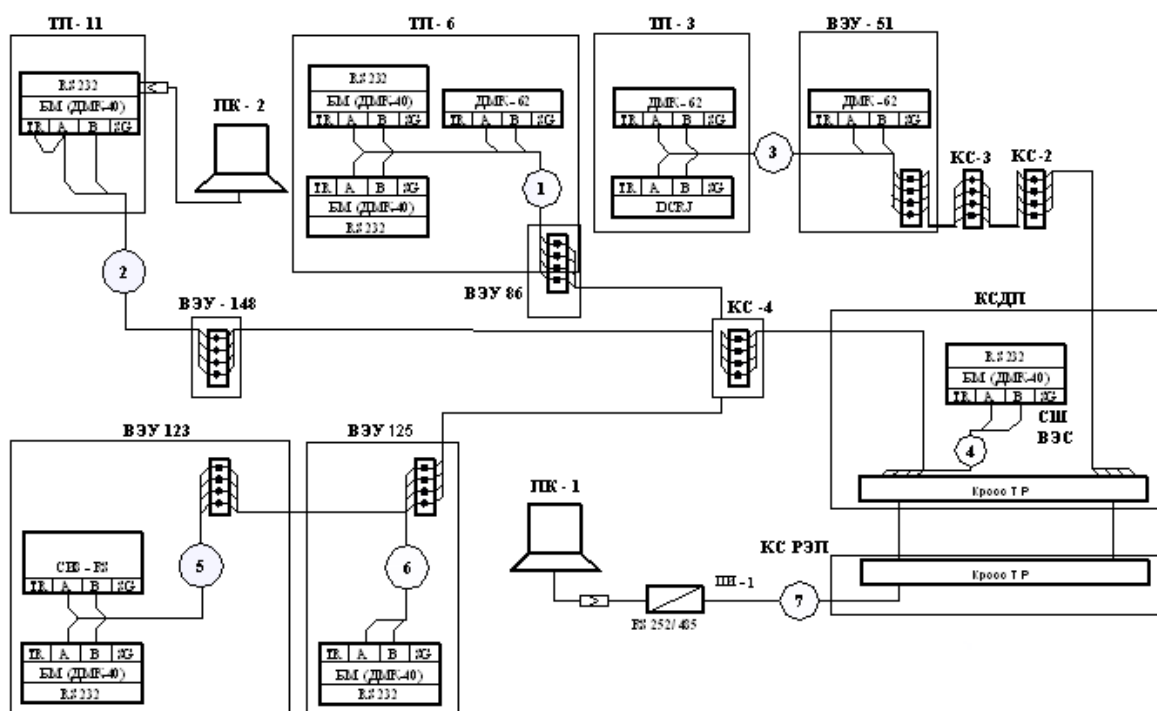


Рис. 4. Схема организации связи передачи данных системы мониторинга на Мирновской ВЭС

Fig. 4. Scheme of the organization of communication of the transfer of data of the monitoring system on Mirnovskaya wind farm

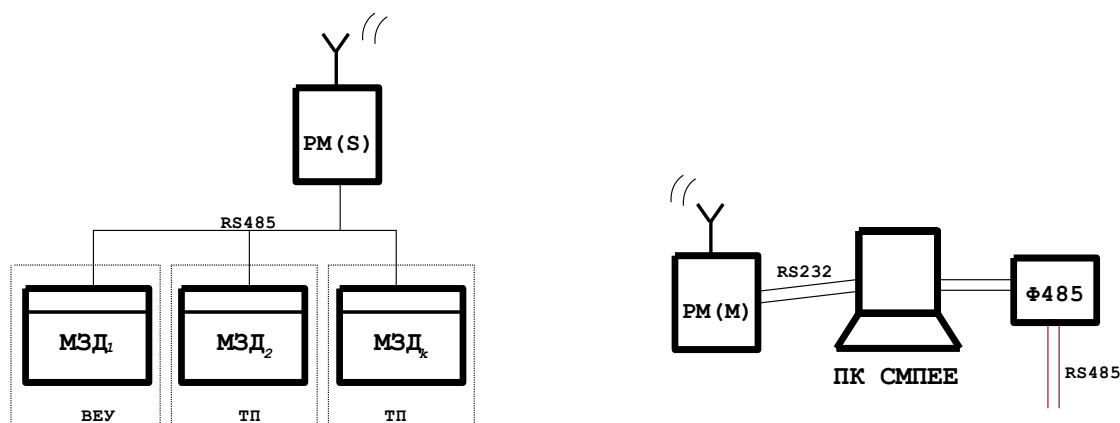


Рис. 5. Схема организации передачи данных системы мониторинга с использованием радиомодема

Fig. 5. Scheme for the organization of data transfer of monitoring systems using a radio modem

Для обмена данными на больших расстояниях наиболее перспективное решение заключается в применении сотовой GSM – сети, основная функция которой состоит в присоединении отдельных устройств к сети интернет через GSM – модемы или GPRS - контроллеры. Это позволяет организовать обмен данными между удаленными информационными точками системы и резидентным ПК на основе протокола TCP/IP, если ПК дать фиксированный IP- адрес. Существенным моментом есть то обстоятельство, при котором оборудование GSM – сети используется только в момент передачи данных. При таком обмене фактическим ограничением числа приборов,

которые одновременно обмениваются данными с ПК, есть пропускная способность канала присоединения к Интернет. Так, при подключении ПК к Интернет через ADSL- модем, который работает на абонентском участке обычной телефонной линии, может осуществляться одновременный обмен данными с несколькими десятками приборов типа ДМК. Это позволяет полностью снять проблему организации обмена данными в реальном масштабе времени для системы мониторинга. На рисунке 6 приведена схема организации передачи данных с применением GPRS - услуги.

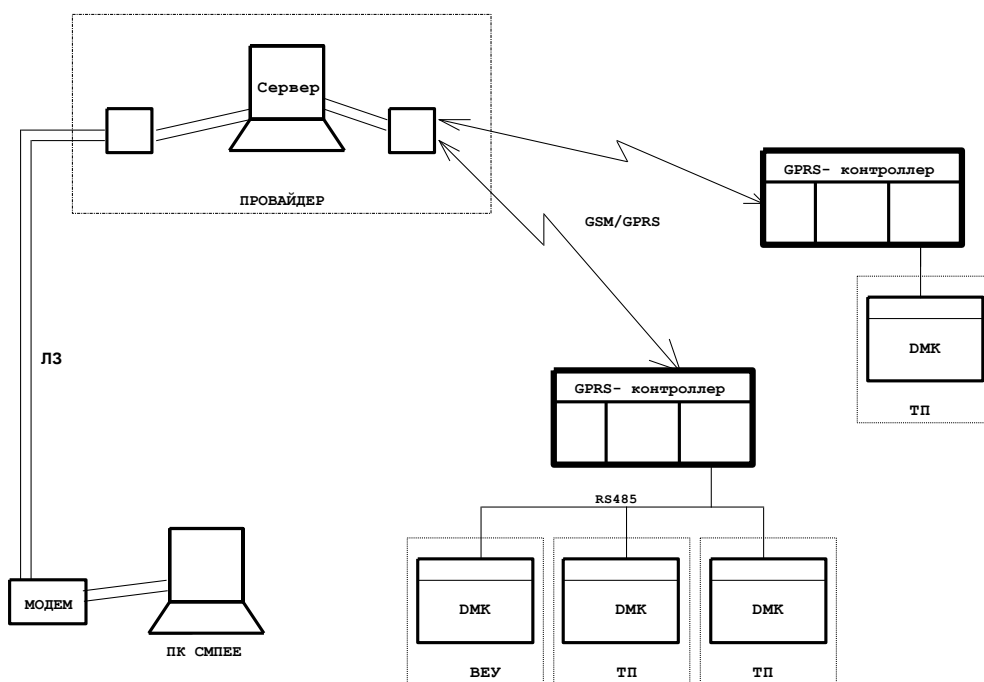


Рис. 6. Схема организации передачи данных системы мониторинга с использованием сотовой связи
Fig. 6. Scheme for the organization of data transfer of monitoring systems using cellular communications

Отдельные территориально близко расположенные мультиметры объединяются проводными линиями последовательного интерфейса в локальные подсистемы с GPRS-контроллерами. Эти контроллеры через GSM-сеть обмениваются данными с GPRS-сервером провайдера интернета, с которым через проводную линию связи соединяется ПК системы мониторинга ВЭС. Такая конфигурация системы, несмотря на увеличение затрат, не только обеспечивает полный сбор и регистрацию всей необходимой информации, но и может быть установлена в точках ВЭС, где вообще нет линий связи.

Варианты построения системы мониторинга параметров электроэнергии промышленных ВЭС были реализованы на Мирновской ВЭС и показали эффективность и возможность применения на других действующих или строящихся станциях.

Экспериментальный образец измерительного комплекса системы автоматического мониторинга параметров электрической энергии был принят в промышленную эксплуатацию на Мирновской ВЭС. Расположение измерительных приборов на составных частях ВЭС показано на схеме (рис. 7). Измерительные приборы системы мониторинга окрашены на схеме в темный цвет и расположены на ВЭУ-123, 125 (ТП-9) и ВЭУ-51 (ТП-3); на ТП-3, 6, 11; на РП-35 кВ (рис. 8). Сервер системы мониторинга размещен на центральном пункте управления станцией. Для связи мультиметров с ПК использована существующая сеть кабелей управления ветроэнергетическими установками через резервные жилы. Информационная связь между трансформаторными подстанциями и ВЭУ осуществляется с помощью прокладки новых коротких кабельных линий.

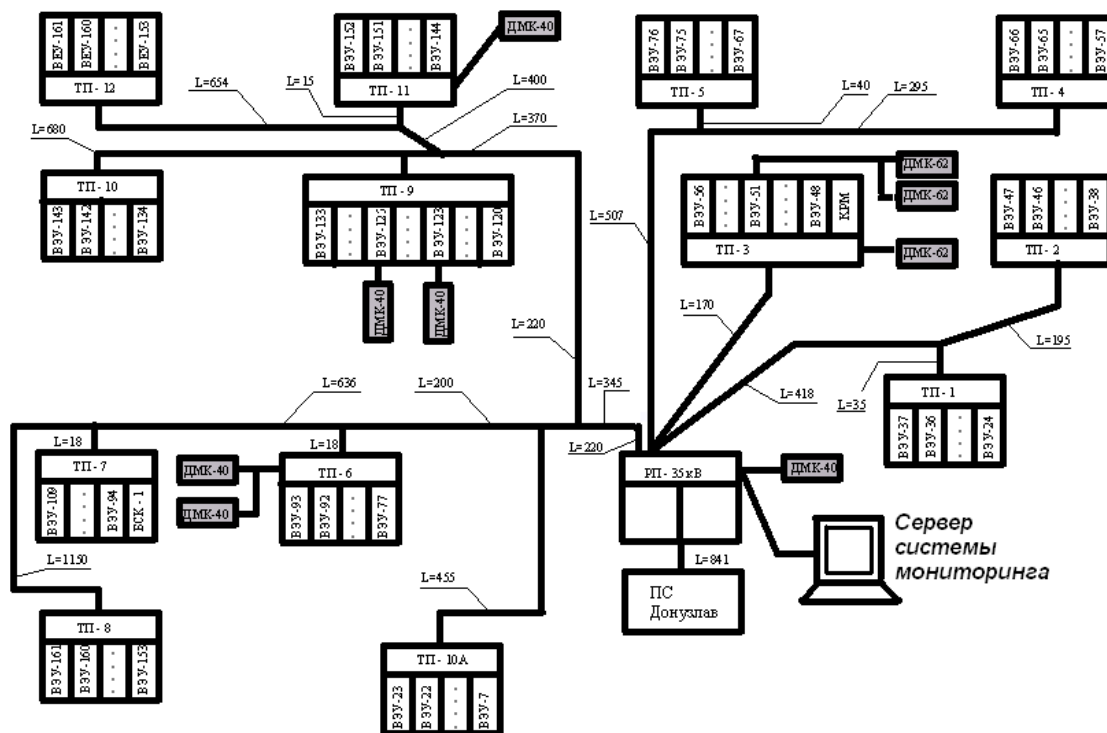


Рис. 7. Схема расположения измерительных приборов на ВЭС
Fig. 7. The location of measuring instruments at the wind farm

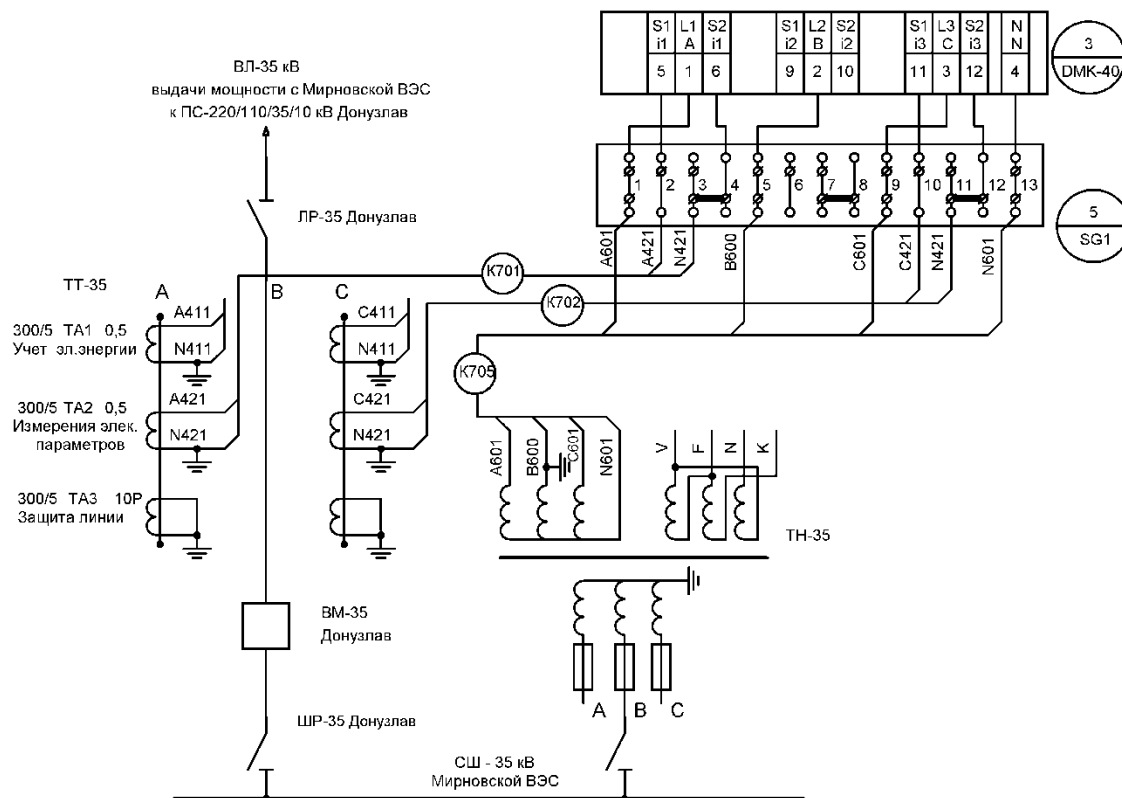


Рис. 8. Схема подключения мультиметра ДМК-40 к шинам 35 кВ Мирновской ВЭС
Fig. 8. DMK-40 multimeter connection diagram to 35 kV tires of the Mirnovskaya wind farm

ВЫВОДЫ

Таким образом, в статье обоснован выбор периода квантования, равный 1 с при измерении реактивной мощности с помощью использования сути теоремы Котельникова. При этом случайная составляющая погрешности не превышает $1,324 \cdot 10^{-3}$, а систематическая составляющая – $3,01 \cdot 10^{-3}$.

Полученные при синхронных измерениях тока цифровым мультиметром с периодом отсчётов 1 с и комплектом в составе измерительного преобразователя и цифрового осциллографа PCS500 с периодом отсчётов 0,1 с осциллограммы свидетельствуют, что выбранный период квантования обеспечивает корректный результат.

Приводится два варианта схем передачи данных от ветроэнергетических установок к управляющему компьютеру: с использованием радиомодема и сотовой связи. Они показали свою эффективность при использовании на Мирновской ветроэлектростанции и могут применяться на других объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хассан Ф.А., Гайнуллина Л.Р., Тимербаев Н.Ф. Методика оценки и прогнозирования среднегодовой скорости и направления ветра на основе данных ветроизмерений // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 3 (55). С. 59-68.
2. Матренин П.В., Манусов В.З., Игумнова Е.А. Устойчивое краткосрочное прогнозирование скорости ветра с помощью адаптивных компактных нейронных сетей // Проблемы региональной энергетики. 2020. № 3 (47). С. 69-80.
3. Min-Woo Baek, Min Kyu Sim and Jae-Yoon Jung; Wind power generation prediction based on weather forecast data using deep neural networks // ICIC Express Letters. 2020. Volume 11, Number 9. pp. 863-868.
4. Lawrence R. Martin. Wind energy - the facts: a guide to the technology economics and future of wind power // Journal of Cleaner Production. 2010. 18 (10). pp. 1122 – 1123.
5. Freitas Nicksson, Silva Marcelino, Sakamoto Meiry. Wind speed forecasting: a review // International Journal of Engineering Science. 2018. 8. 10.9790/9622-0801010409.
6. Безязычный В.С., Велигура С.А., Калашников А.И., Надтока И.И. Анализ зависимостей электропотребления в энергосистеме от скорости ветра и эффективной температуры воздуха и использование их при краткосрочном прогнозировании // В сборнике: Электроэнергетика глазами молодежи - 2020. материалы XI Международной научно-технической конференции. В 2-т.. Ставрополь, 2020. С. 147-150.
7. Насырова Е.В., Тимербаев Н.Ф., Леухина О.В., Мазаров И.Ю. Анализ данных ветромониторинга в республике Татарстан // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 6. С. 39-50.
8. Hellmann G. Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre. Meteorol. Zeit. 1915. Vol. 32. pp. 1 – 16.
9. Хассан Ф.А., Алали Ш., Гайнуллина Л.Р. Повышение эффективности ветровых электростанций // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 217-227.
10. Шерязов С.К., Исенов С.С., Исаков Р.М. и др. Основные типы ветротурбин-генераторов в системе электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 5. С. 24 – 33.
11. Широкова О.Е., Лапонов А.С. Вопросы компенсации реактивной мощности в электросетях // В сборнике: Проблемы энергообеспечения, автоматизации, информатизации и природопользования в АПК. Сборник материалов международной научно-технической конференции. 2022. С. 260 – 263.
12. Shankar Rajukkannu, Gomathy Velmurugan, Ramkumar Pandian, (2024). An Effective SST-FLC for Mitigation of Reactive Power Compensation of DFIG Based Wind Energy Conversion System // Electric Power Components and Systems. 1-18. 10.1080/15325008.2023.2298268.
13. Вдовин Д.В., Имелбаев Ф.Ф., Нефедова А.А. Функциональная модель контроллера ветроэлектростанции с логической схемой управления и контроля активной и реактивной мощности // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. 2023. № 10. С. 49-56.
14. Андрияшанов Д.А., Брацок Ф.О., Никишин А.Ю. Регулирование реактивной мощности ветроэлектростанций при подключении к энергосистеме Калининградской области // Вестник молодежной науки. 2018. № 5 (17). С. 15.
15. Yanping Deng, Ye Du, Yifan Sun, etc. (2024). Distributed energy storage participates in reactive power optimization strategy research of new distribution system // Journal of Physics Conference Series. 2831. 012036. 10.1088/1742-6596/2831/1/012036.
16. Тропин В.В., Кучеренко Р.Е., Кучеренко Д.Е. Анализ эффективности устройств измерения и регулирования реактивной мощности в сельских электрических сетях 0,4 кВ. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна". 2024. 162 с.
17. Серов А.Н., Иваненко К.А., Золкин Д.С. Применение преобразователя герцеля для измерения параметров реактивной мощности // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. 2022. № 2 (18). С. 75-86.
18. Лычев А.О. Оценка влияния погрешности квантования на результат измерения активной и реактивной мощностей // Южно-Сибирский научный вестник. 2013. № 1 (3). С. 61-63.
19. Серов А.Н., Иваненко К.А., Подобуев С.А., Шатохин А.А. Оценка влияния апертурной задержки ацп на погрешность измерения

реактивной мощности // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 3 (49). С. 121-130.

REFERENCES

1. Hassan F.A., Gainullina L.R., Timerbaev N.F. Methods of evaluating and forecasting the average annual speed and direction of wind based on wind measurements. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2022. Vol. 14. No. 3 (55). pp. 59-68. (In Russian).
2. Matrynin P.V., Manusov V.Z., Igumnova E.A. Sustainable short-term forecasting of wind speed using adaptive compact neural networks. *Problemy regional'noj energetiki*. 2020. No. 3 (47). pp. 69-80. (In Russian).
3. Min-Woo Baek, Min Kyu Sim and Jae-Ion Jung; Wind Power Generation Prediction Based on Weather Forecast Data Using Deep Neural Networks. *ICIC Express Letters*. 2020. Volume 11, Number 9. pp. 863-868.
4. Lawrence R. Martin. Wind Energy - The Facts: A Guide to the Technology Economics and Future of Wind Power. *Journal of Cleaner Production*. 2010. 18 (10). pp. 1122 - 1123.
5. Freitas Nicksson, Silva Marcelino, Sakamoto Meiry. Wind Speed Forecasting: A Review // *International Journal of Engineering Science*. 2018. 8. 10.9790/9622-0801010409.
6. Bez'yazychnyj V.S., Veligura S.A., Kalashnikov A.I., Nadтока I.I. Analysis of the dependencies of electrical consumption in the energy system on the wind speed and the effective air temperature and their use for short-term forecasting. In the collection: Electric power industry with the eyes of youth - 2020. Materials of the XI International Scientific and Technical Conference. In 2-t .. Stavropol, 2020. pp. 147-150. (In Russian).
7. Nasyrova E.V., Timerbaev N.F., Leuhina O.V., Mazarov I.Yu. Analysis of windmoming data in the Republic of Tatarstan. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2019. Vol. 21. No. 6. pp. 39-50. (In Russian).
8. Hellmann G. Uber Die Bewegung Der Luft in Den Unterten Schichten Der Atmosphere. *Meteorol. Zeit*. 1915. Vol. 32. pp. 1 - 16.
9. Hassan F.A., Alali Sh., Gainullina L.R. Improving the efficiency of wind power plants. *Ipolytech Journal*. 2022. Vol. 26. No. 2. pp. 217-227. (In Russian).
10. Sher'yazov S.K., Isenov S.S., Iskakov R.M. i dr. The main types of wind turbine generators in the power supply system. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*. 2021. Vol. 23. No. 5. pp. 24 - 33. (In Russian).
11. Shirobokova O.E., Laponov A.S. Issues of compensation for reactive power in electric networks. In the collection: problems of energy supply, automation, informatization and nature management in the agro - industrial complex. A collection of materials of the International Scientific and Technical Conference. 2022. pp. 260 - 263. (In Russian).
12. Shankar Rajukkannu, Gomathy Velmurugan, Ramkumar Pandian, (2024). An Effective SST-FLC for MITIGATION OF REACTID POWER COMPENSATION OF DFID WIND ENERGY Conversion System. *Electric Power Components and Systems*. 1-18. 10.1080/15325008.2023.2298268.
13. Vdovin D.V., Imelbaev F.F., Nefedova A.A. The functional model of the wind farm controller with the logical control and control of active and reactive power. *KIP i avtomatika: obsluzhivanie i remont*. 2023. No. 10. pp. 49-56. (In Russian).
14. Andryushanov D.A., Bracyuk F.O., Nikishin A.Yu. Regulation of the reactive power of wind farms when connecting to the energy system of the Kaliningrad region. *Vestnik molodezhnoj nauki*. 2018. No. 5 (17). pp. 15. (In Russian).
15. Yanping Deng, Ye Du, Yifan Sun, etc. (2024). Distributed Energy Storage Participates in Reactive Power Optimization Strategy of New Distribution System. *Journal of Physics Conference Seres*. 2831. 012036. 10.1088/1742-6596/2831/1/012036.
16. Tropin V.V., Kucherenko R.E., Kucherenko D.E. Analiz effektivnosti ustrojstv izmereniya i regulirovaniya reaktivnoj moshchnosti v sel'skih elektricheskikh setyah 0,4 kV [Analysis of the effectiveness of devices for measuring and regulating reactive power in rural electric networks 0.4 kV]. Ufa: Limited Liability Company "Aetern". 2024. 162 p. (In Russian).
17. Serov A.N., Ivanenko K.A., Zolkin D.S.. The use of Herzel converter to measure reactive power parameters. *Automation and measurement in machine-construction*. 2022. No. 2 (18). pp. 75-86. (In Russian).
18. Lychev A.O. Assessment of the influence of quantum error on the result of measurement of active and reactive capacities. *Yuzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik*. 2013. No. 1 (3). pp. 61-63. (In Russian).
19. Serov A.N., Ivanenko K.A., Podobuev S.A., Shatohin A.A. Assessment of the influence of the apertured delay in ADC on the error of the measurement of reactive power. *Yuzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik*. 2023. No. 3 (49). pp. 121-130. (In Russian).

JUSTIFICATION OF THE PERIOD OF QUANTIZING MEASUREMENTS OF STOCHASTIC PROCESSES OF CONSUMPTION AND GENERATING REACTIVE POWER

Bekirov E.A., Voskresenskaya S.N.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Institute of Physics and Technology, Simferopol, 181, Kyivska Street, e-mail:
Bekirov.e.a@cfuv.ru

Abstract. The article provides a schedule for measuring reactive power at the Mirnovskaya wind farm with a quantization period of 1 second and a measurement time of 0.2 second. The choice of quantification period is justified using the Kotelnikov theorem. The measurements of the same parameter were performed by synchronously digital multimeter with a period of 1 second references and a set as part of a measuring converter and digital oscilloscope PCS500 with a reference period of 0.1 second. At the same time, the interval of the velocity of the wind was taken into account. The measurement scheme is given for this case, providing for the transfer of information to a personal computer. The errors of measurements of stochastically changing electrical parameters of a wind energy installation are evaluated. The options for the organization of the organization of data transfer of the monitoring system for the wind farm as a whole are shown.

Subject: wind farm. The study is aimed at solving the problem associated with the accuracy of conducting reactive power due to the stochastic nature of its generation and consumption, and the transfer of data from a number of wind turbines that are part of the wind farm.

Materials and methods: both analytical and calculated methods based on the use of Kotelnikov theorems, as well as experimental methods, were used.

Results: It was established that the selected quantization period in 1 second provides a clear and correct picture of changing the parameters of the generated energy by a wind turbine.

Conclusions: Studies have shown the correctness of the methodology for determining the reactive power for the stochastic generation and consumption on the wind farm by a separate measurement of current and voltage, as well as when transmitting data using a radio modem or cellular communication. This technique and schemes can be used at other energy facilities.

Key words: wind turbine, wind farm, reactive power, quantizing, oscillogram, modem, controller.