

Научная статья
УДК 551.5:629.7
DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-52-59

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

**Юрий Борисович Попов^{1✉}, Антон Павлович Корнаков², Ксения Юрьевна Попова³,
Евгений Владимирович Макаров⁴**

^{1, 2, 3, 4} Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Россия

¹ *iurii.b.popov@tusur.ru* , <https://orcid.org/0000-0002-1627-2188>

² *deidara2074@gmail.com*

³ *dku81@mail.ru*

⁴ *evmakarov@yahoo.com*

Аннотация. В статье рассмотрен способ определения значений скорости и направления ветра в требуемой точке атмосферного пограничного слоя с использованием беспилотного летательного аппарата мультироторного типа. Расчет скорости и направления ветра осуществляется в режиме зависания мультикоптера в точке с заданными координатами с использованием текущих измерений наклона вектора тяги, потребляемой каждым двигателем мощности, и угла ориентации корпуса относительно опорного направления. Ошибки измерений вектора ветра, связанные с различным ракурсом и парусностью конструкции, компенсируются за счет вращения беспилотного летательного аппарата вокруг вертикальной оси с последующим усреднением накопленных данных.

Ключевые слова: БПЛА, беспилотный летательный аппарат, мультикоптер, измерение скорости ветра, скорость ветра, направление ветра

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-11-2021-035 от 24.06.2021.

Для цитирования: Попов Ю. Б., Корнаков А. П., Попова К. Ю., Макаров Е. В. Определение скорости и направления ветра с помощью беспилотного летательного аппарата // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 52–59. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-52-59.

Original article

MEASURING WIND VELOCITY USING UNMANNED AERIAL VEHICLE

Yuri B. Popov^{1✉}, Anton P. Kornakov², Kseniya Yu. Popova³, Evgeniy V. Makarov⁴

^{1, 2, 3, 4} Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

¹ *iurii.b.popov@tusur.ru* , <https://orcid.org/0000-0002-1627-2188>

² *deidara2074@gmail.com*

³ *dku81@mail.ru*

⁴ *evmakarov@yahoo.com*

Abstract. The article discusses a method for determining the wind velocity values at a desired point of the atmospheric boundary layer using a multirotor unmanned aerial vehicle. Wind velocity is calculated via a multicopter in hovering mode at a target point using current measurements of the thrust vector angle, the power consumed by each engine, and the angle of the frame orientation relative to the boresight. Wind vector measurement errors associated with different angles and windage of the body are compensated by rotating the unmanned aerial vehicle around the vertical axis with subsequent averaging of the accumulated data.

Keywords: UAV, unmanned aerial vehicle, multicopter, wind speed measurement, wind speed, wind direction

Funding: the study is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement No. 075-11-2021-035 of June 24, 2021.

For citation: Popov Yu. B., Kornakov A. P., Popova K. Yu., Makarov E. V. Measuring wind velocity using unmanned aerial vehicle. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(3):52–59. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-52-59.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из интенсивно развивающихся научно-технических направлений в последнее время стало конструирование, производство и применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1–2]. Перечень приложений, в которых применяются БПЛА (или иначе дроны), затрагивает самые различные сферы человеческой деятельности, при этом список решаемых задач непрерывно расширяется. Одной из прикладных задач, в решении которой могут и должны быть использованы БПЛА, является метеорологические измерения параметров состояния атмосферы [3–8]. Такие измерения используют при краткосрочном прогнозировании погоды, что является вос требованным для многих сфер жизнедеятельности человека. В частности, прогноз погоды необходим для задач агропромышленного комплекса, экологического мониторинга атмосферы над урбанизированными территориями, для решения специальных задач силовых структур и пр. При этом для достоверного предсказания метеоусловий необходимы оперативные измерения метеорологических величин в вертикальном профиле атмосферного пограничного слоя (АПС) на различных высотах, в различных районах, в разные моменты времени. Традиционно для таких измерений используют контактные методы (КМ), основанные на применении шаров-зондов, метеомачт, самолетов, аэростатов. Очевидно, что перечисленные технические средства не соответствуют современным требованиям оперативности, периодичности, точности и территориальному охвату метеонаблюдений. Наиболее перспективным для измерений вертикальных профилей метеорологических величин в АПС является использование БПЛА на базе мультироторных аэромобильных платформ (МАП) – мультикоптеров. Высокая стабильность в полете, устойчивость к ветровым нагрузкам, наличие программируемых бортовых навигационных устройств позволяют использовать данный тип БПЛА в широком диапазоне метеорологических условий, в любое время суток, в режиме ручного управления оператором или автономно с использованием полетного контроллера с запрограммированным маршрутом. Осна

щение МАП блоком метеорологических датчиков позволяет проводить контактные измерения вертикального профиля в АПС при каждом подъеме и спуске аппарата.

К сожалению, при достаточно широком выборе датчиков для измерения основных метеорологических величин (температура, давление, влажность) в настоящее время пока не существует малогабаритных устройств, обеспечивающих оперативное измерение характеристик ветра на борту МАП. Здесь под ветром понимается горизонтальное перемещение воздушных масс относительно земной поверхности [3, 5]. При этом текущее значение скорости ветра в некоторой точке АПС определяется двумя компонентами: собственно модулем скорости ветра и его направлением. Существующая вертикальная составляющая вектора ветра в данной работе не рассматривается.

Как правило, измерение компонент вектора ветра осуществляется опосредованно через внешний контроль текущего положения несущей платформы (с помощью радаров и лидаров) либо по данным бортовых навигационных устройств, обеспечивающих оценку параметров движения платформы на основе спутниковой навигации (GNSS). Анализ научных публикаций, а также патентный поиск показали, что вопросу определения скорости и направления ветра с помощью БПЛА уделяется большое внимание [9–12]. Это свидетельствует об актуальности задач развития и совершенствования методов измерения текущих компонент вектора ветра непосредственно на борту БПЛА.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На основе [9–12] авторами был разработан новый метод измерения скорости и направления ветра с помощью БПЛА мультироторного типа. В данном случае рассматривается квадрокоптер, т. е. мультикоптер, оснащенный четырьмя двигателями. Метод предполагает, что на борту БПЛА установлен стандартный набор навигационного оборудования: приемник системы GNSS, гироскоп, компас. Кроме этого, установлены: датчики для измерения мощности, потребляемой каждым маршевым электродвигателем квадрокоптера в текущий

момент времени, а также бортовой вычислитель (контроллер) для обработки измеряемых данных.

Процесс измерения начинается с предварительного вывода БПЛА в определенную точку пространства вручную либо по про-

граммме, заранее заложенной в полетный контроллер. После чего квадрокоптер переводят в режим удержания заданных координат: высоты, широты и долготы (рис. 1). Продольную ось аппарата ориентируют в направлении на север (рис. 2).

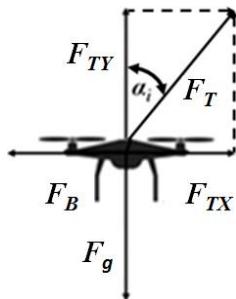


Рис. 1. Силы, действующие на БПЛА в режиме зависания
 Примечание: составлено авторами.

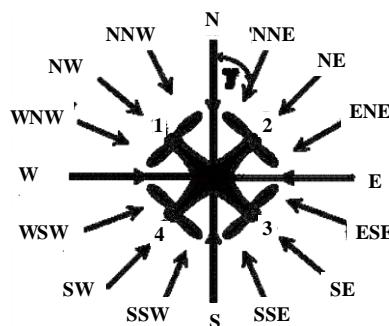


Рис. 2. Диаграмма относительного направления ветра
 Примечание: составлено авторами.

После этого, по заданной программе, БПЛА начинает выполнять вращение в горизонтальной плоскости вокруг своей вертикальной оси. Вращение применяется для компенсации ошибок измерений, связанных с парусностью корпуса, которая меняется при различных курсах МАП по отношению к направлению ветра. Разница между направлением на север и положением продольной оси аппарата рассматривается как текущий курсовой угол γ (рис. 2). Вращение выполняется по часовой стрелке до завершения полного оборота. При этом курсовой угол БПЛА изменяется с шагом $22,5^\circ$ (рис. 2) и принимает следующие значения: $0^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ, 67,5^\circ, \dots, 337,5^\circ$. Очевидно, что за полный оборот количество угловых положений мультикоптера γ_i составит ($i = 1, 2, 3 \dots M$), где $M = 16$. Для каждого углового положения γ_i измеряются и вносятся

в память бортового вычислителя навигационные параметры, представленные на рис. 1–2. Измеренные величины используются для расчета направления и скорости ветра в текущей точке пространства.

Детальный алгоритм расчета элементов скорости ветра представлен ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для расчета модуля скорости ветра использован следующий подход.

На рис. 1 показаны силы, действующие на квадрокоптер в режиме удержания заданных координат (в режиме зависания).

Здесь F_T – сила тяги двигателей; F_g – сила тяжести; F_B – сила, с которой ветер воздействует на аппарат; F_{Tx} – сила горизонтального уравновешивания; F_{Ty} – сила вертикального уравновешивания; α_i – угол наклона вектора тяги.

Очевидно, что в режиме зависания БПЛА в заданной точке пространства сила тяги F_T должна компенсировать силу тяжести F_g и силу ветра F_B . Соответственно, вектор F_T можно разложить на две ортогональные составляющие F_{Tx} и F_{Ty} . Из рис. 1 следует, что составляющая F_{Tx} уравновешивает силу ветра F_B и является проекцией силы тяги F_T на горизонтальную плоскость:

$$F_{Tx} = F_T \times \sin \alpha_i, \quad (1)$$

где α_i – текущий угол наклона вектора тяги при очередном повороте i мультикоптера в горизонтальной плоскости.

При этом F_{Tx} связана с силой ветра простым соотношением:

$$F_B = -F_{Tx}. \quad (2)$$

Также из рис. 1 следует, что в режиме зависания и удержания координат значение вектора тяги БПЛА пропорционально силе тяжести, что может быть представлено следующим образом:

$$F_{Ty} = -F_g, \quad (3)$$

$$F_T = F_{Tx} \times (\cos \alpha_i)^{-1} = -F_g \times (\cos \alpha_i)^{-1}. \quad (4)$$

Откуда из (1) следует:

$$F_{Tx} = -F_g \times \frac{\sin \alpha_i}{\cos \alpha_i} = -F_g \times \operatorname{tg} \alpha_i, \quad (5)$$

а из (2):

$$F_B = F_g \times \operatorname{tg} \alpha_i. \quad (6)$$

В соответствии со вторым законом Ньютона связь между силой ветра и его скоростью может быть задана следующим выражением [13]:

$$F_B = m A_{xi} = m \dot{V}_i, \quad (7)$$

где $A_{xi} = \dot{V}_i = \frac{dV_i}{dt}$ – ускорение, соответствующее угловой ориентации γ_i ($i = 1, 2, 3 \dots M$);

V_i – модуль скорости ветра, соответствующий текущей угловой ориентации БПЛА γ_i в горизонтальной плоскости (рис. 2).

При условии $F_g = mg$ из выражений (6) и (7) следует:

$$F_B = mg \times \operatorname{tg} \alpha_i = m A_{xi}, \quad (8)$$

где g – ускорение свободного падения.

Из (8) следует, что:

$$A_{xi} = g \times \operatorname{tg} \alpha_i. \quad (9)$$

Интегрируя левую и правую части уравнения (9) по dt , определим модуль горизонтальной составляющей скорости ветра для текущей угловой ориентации γ_i :

$$\int_{t_{i-1}}^{t_i} A_{xi} dt = \int_{t_{i-1}}^{t_i} (g \times \operatorname{tg} \alpha_i) dt = g \times \operatorname{tg} \alpha_i \times \Delta T_i. \quad (10)$$

Из (7) и (10) следует:

$$V_i = g \times \operatorname{tg} \alpha_i \times \Delta T_i, \quad (11)$$

где $\Delta T_i = t_i - t_{i-1}$ – время поворота БПЛА между двумя последовательными угловыми положениями γ_{i-1} и γ_i .

Расчет модуля скорости ветра за полный оборот квадрокоптера вокруг своей оси выполняется по общезвестной формуле усреднения [14]:

$$\bar{V} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M V_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (g \times \operatorname{tg} \alpha_i \times \Delta T_i), \quad (12)$$

где \bar{V} – среднее для совокупности значений V_i .

В свою очередь, направление ветра (откуда дует) может быть определено по соотношению мощности W_{ij} , потребляемой каждым двигателем в режиме зависания. Очевидно, что для компенсации скорости ветра и горизонтального смещения БПЛА полетный контроллер выполняет перераспределение мощности, потребляемой маршевыми двигателями. При этом обеспечивается требуемый угол наклона вектора тяги α_i (рис. 1). На рис. 2. показаны размещение и нумерация двигателей ($j = 1, 2, 3, 4$) и относительное направление ветра без привязки к абсолютному направлению оси БПЛА (курсовой угол). Символы для направления, откуда дует ветер, соответствуют общепринятым обозначениям сторон света по компасу. Если рассмотреть мгновенное соот-

ношение мощностей двигателей W_{ij} , можно составить таблицу логического соответствия

комбинации мощностей и относительного направления вектора β_i (таблица).

Таблица

Определение относительного направления ветра по соотношению мощности, потребляемой двигателями

Относительное направление ветра, β	Соотношение потребляемой двигателями мощности
N (0°)	$W_2 = W_4 > W_1 = W_3$
NNE (22,5°)	$W_2 > W_4 > W_3 > W_1$
NE (45°)	$W_2 > W_3 = W_4 > W_1$
NEE (67,5°)	$W_2 > W_3 > W_4 > W_1$
E (90°)	$W_3 = W_2 > W_1 = W_4$
SEE (112,5°)	$W_3 > W_2 > W_1 > W_4$
SE (135°)	$W_3 > W_1 = W_2 > W_4$
SSE (157,5°)	$W_3 > W_1 > W_2 > W_4$
S (180°)	$W_1 = W_3 > W_2 = W_4$
SSW (202,5°)	$W_1 > W_3 > W_4 > W_2$
SW (225°)	$W_1 > W_3 = W_4 > W_2$
SWW (247,5°)	$W_1 > W_4 > W_3 > W_2$
W (270°)	$W_1 = W_4 > W_3 = W_2$
NWW (292,5°)	$W_4 > W_1 > W_2 > W_3$
NW (315°)	$W_4 > W_1 = W_2 > W_3$
NWW (337,5°)	$W_4 > W_2 > W_1 > W_3$

Примечание: составлено авторами.

Истинное (полное) направление ветра находится как сумма относительного направления ветра и угла поворота корпуса БПЛА γ_i в горизонтальной плоскости (текущего курсового угла):

$$\theta_i = \beta_i + \gamma_i, \quad (13)$$

где θ_i – истинное (полное) направление ветра; β_i – относительное направление ветра.

Среднее значение для направления ветра (13) за полный оборот БПЛА вокруг вертикальной оси рассчитывается по общезвестной формуле усреднения [14]:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \theta_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\beta_i + \gamma_i). \quad (14)$$

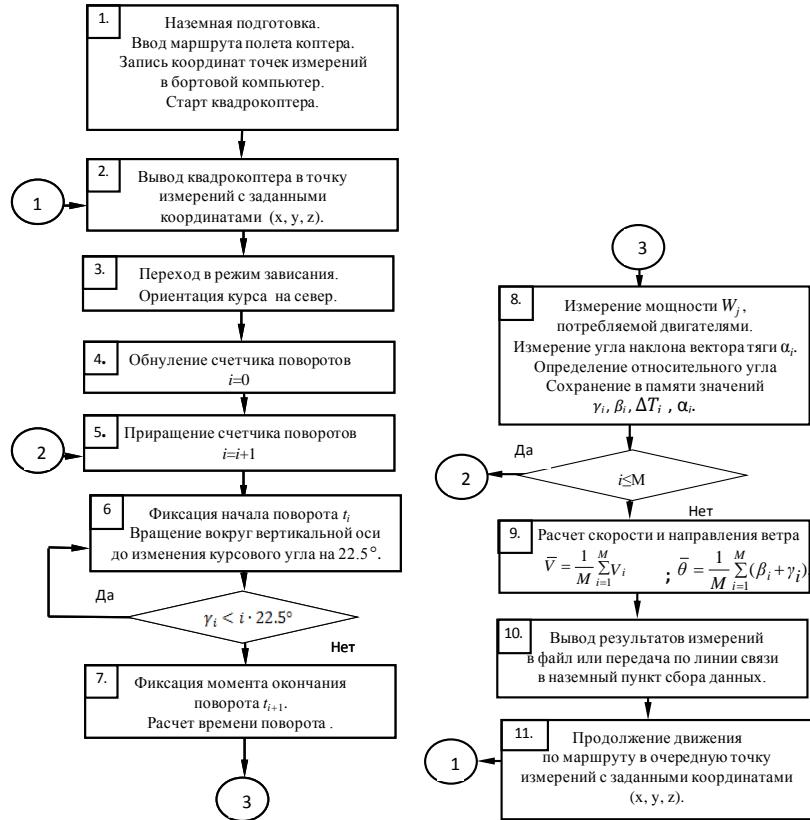
Таким образом, выражения (12) и (14) определяют усредненные значения составляющих вектора горизонтального ветра в точке с заданными координатами. Меняя высоту полета БПЛА с определенным шагом, можно выполнить измерения ветра в требуемом вертикальном профиле АПС.

На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма, в соответствии с которым выполняются

измерения навигационных параметров, расчет скорости и направления ветра.

Алгоритм определяет последовательность операций, которые выполняются начиная с предполетной подготовки МАП. На первом этапе (Блок 1) необходимо участие оператора, который закладывает в бортовой компьютер МАП данные маршрута. При этом основными характеристиками являются координаты точек, в которых будут выполняться измерения. После старта МАП процесс выполняется автоматически по заложенной программе (Блок 2).

Очевидно, что для измерений скорости и направления ветра в вертикальном профиле АПС точки маршрута должны иметь одинаковые координаты в горизонтальной плоскости (точка привязки на поверхности земли) и отличаться по высоте. Особенностью предложенной методики является то, что в процессе измерений МАП не смещается относительно заданной точки привязки (Блок 3). Это позволяет исключить энергозатраты, связанные с перемещением БПЛА по ветру и возврат в исходную точку, как реализовано в методиках [9, 10].



подход можно считать универсальным, поскольку возможны варианты применения других контрольных величин, опосредованно связанных с мощностью. Например, без существенных ограничений в процедуре сравнения можно использовать значения сигналов управления двигателями, задающих частоту вращения.

3. В работе рассмотрен вариант определения направления ветра с усреднением по 16 измерениям. Количество измерений можно

сократить до 4 при выборе шага поворота 90°. В этом случае уменьшается общее время измерения за оборот и сохраняется возможность компенсации ошибки, связанной с разным ракурсом корпуса БПЛА по отношению к направлению ветра.

Дальнейшее развитие метода следует рассматривать в части исследований его точности и реализации в различных конструкциях дронов.

Список источников

1. Khan A. C., Alvi B. A., Safi E. A. et al. Drones for good in smart cities: A review. In: *Proceedings of the International Conference on Electrical, Electronics, Computers, Communications, Mechanical and Computing (EECCMC)*, January 28–29, 2018, India. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/316846331_Drones_for_Good_in_Smart_CitiesA_Review (дата обращения: 15.06.2023).
2. Floreano D., Wood R. J. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*. 2015;521(7553):460–466.
3. Растворгув И. П. Беспилотные технологии мониторинга погодных условий // Гелиогеофизические исследования. 2014. № 8. С. 51–54.
4. Brosy C., Krampf K., Zeeman M. et al. Simultaneous multicopter-based air sampling and sensing of meteorological variables. *Atmos Meas Tech Discuss*. 2017;10:2773–2784.
5. Ситников Н. М., Акмулин Д. В., Борисов Ю. А. и др. Использование беспилотных летательных аппаратов для мониторинга атмосферы // Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 90–99.
6. Chang C.-C., Chang C.-Y., Wang J.-L. et al. An optimized multicopter UAV sounding technique (MUST) for probing comprehensive atmospheric variables. *Chemosphere*. 2020;254:126867.
7. Кураков С. А., Зуев В. В. Беспилотный измеритель вертикальных профилей метеопараметров в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 994–999.
8. Popov Yu. B., Karpushin P. A., Krasnenko N. P. et al. Meteorological multi-rotor unmanned aerial complex and its application for monitoring of the atmosphere. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*. 2022;1040:012006.
9. Кураков С. А., Куракова П. С., Куракова О. А. и др. Способ определения усредненных значений горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра и его направления : патент 2650094C2 Рос. Федерация. № 2016119943 : заявл. 23.05.2016 ; опубл. 06.04.2018. URL: https://i.moscow/patents/RU2650094C2_20180406 (дата обращения: 15.06.2023).
10. Определение скорости движения воздуха. URL: <https://ivgpu.ru/images/docs/ob-universitete/instituty->

References

1. Khan A. C., Alvi B. A., Safi E. A. et al. Drones for good in smart cities: A review. In: *Proceedings of the International Conference on Electrical, Electronics, Computers, Communications, Mechanical and Computing (EECCMC)*, January 28–29, 2018, India. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/316846331_Drones_for_Good_in_Smart_CitiesA_Review (accessed: 15.06.2023).
2. Floreano D., Wood R. J. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*. 2015;521(7553):460–466.
3. Rastorguev I. P. Bespilotnye tekhnologii monitoringa pogodnykh uslovii. *Heliogeophysical Research*. 2014;(8):51–54. (In Russian).
4. Brosy C., Krampf K., Zeeman M. et al. Simultaneous multicopter-based air sampling and sensing of meteorological variables. *Atmos Meas Tech Discuss*. 2017;10:2773–2784.
5. Sitnikov N. M., Akmulin D. V., Borisov Yu. A. et al. Ispolzovanie bespilotnykh letatelnnykh apparatov dlja monitoringa atmosfery. *Meteorologija i gidrologija*. 2013;(1):90–99. (In Russian).
6. Chang C.-C., Chang C.-Y., Wang J.-L. et al. An optimized multicopter UAV sounding technique (MUST) for probing comprehensive atmospheric variables. *Chemosphere*. 2020;254:126867.
7. Kurakov S. A., Zuev V. V. Unmanned aerial vehicle for measuring vertical profiles of the meteorological parameters in the atmospheric boundary layer. *Optika atmosfery i okeana*. 2016;29(11):994–999. (In Russian).
8. Popov Yu. B., Karpushin P. A., Krasnenko N. P. et al. Meteorological multi-rotor unmanned aerial complex and its application for monitoring of the atmosphere. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*. 2022;1040:012006.
9. Kurakov S. A., Kurakova P. S., Kurakova O. A. et al. Method of the wind speed and its directions horizontal and vertical components averaged values determination. RU Patent 2650094C2. No. 2016119943, filed May 23, 2016, issued April 6, 2018. URL: https://i.moscow/patents/RU2650094C2_20180406 (accessed: 15.06.2023). (In Russian).
10. Opredelenie skorosti dvizhenija vozdukha. URL: <https://ivgpu.ru/images/docs/ob-universitete/instituty->

- fakultety-kafedry/ti/fakultety-kafedry/fttiim/tb/publi-katsii/opred-skorosty.pdf (дата обращения: 15.06.2023).
11. Kochin A. V., Treshchalin A. P. Способ определения усредненного вектора скорости ветра с помощью беспилотного летательного аппарата : патент 2695698C1 Рос. Федерация. № 2018132992 ; заявл. 17.09.2018; опубл. 25.07.2019. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2695698C1> (дата обращения: 15.06.2023).
12. Каплин А. Ю., Степанов М. Г. Способ определения скорости и направления ветра с использованием беспилотного летательного аппарата : патент 2744772C1 Рос. Федерация. № 2020127102 ; заявл. 12.08.2020 ; опубл. 15.03.2021. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2744772C1> (дата обращения: 15.06.2023).
13. Маркеев А. П. Теоретическая механика. М. : ЧеРо, 1999. 572 с.
14. Большаков В. Д. Теория ошибок наблюдений. М. : Недра, 1983, 223 с.
- fakultety-kafedry/ti/fakultety-kafedry/fttiim/tb/publi-katsii/opred-skorosty.pdf (accessed: 15.06.2023). (In Russian).
11. Kochin A. V., Treshchalin A. P. Method for determining averaged wind speed vector using an unmanned aerial vehicle. RU Patent 2695698C1. No. 2018132992, filed September 17, 2018, issued July 25, 2019. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2695698C1> (accessed: 15.06.2023). (In Russian).
12. Kaplin A. Yu., Stepanov M. G. Method for determining wind speed and direction using unmanned aircraft. RU Patent 2744772C1. No. 2020127102, filed August 12, 2020, issued March 15, 2021. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2744772C1> (accessed: 15.06.2023). (In Russian).
13. Markeev A. P. Teoreticheskaiia mekhanika. Moscow: CheRo; 1999. 572 p. (In Russian).
14. Bolshakov V. D. Teoriia oshibok nabliudeni. Moscow: Nedra; 1983. 223 p. (In Russian).

Информация об авторах

Ю. Б. Попов – кандидат технических наук, доцент.

А. П. Корнаков – студент.

К. Ю. Попова – кандидат физико-математических наук, доцент.

Е. В. Макаров – заведующий лабораторией.

Information about the authors

Yu. B. Popov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

A. P. Kornakov – Student.

K. Yu. Popova – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

E. V. Makarov – Head of the Laboratory.