

УДК 62.002(063)

А.М. Кориков, Я.Е. Мещеряков

## Ориентация горных технологических машин на основе микроэлектромеханических систем

Параметры ориентации горных технологических машин (ГТМ), определяемые с применением микроэлектромеханических систем (МЭМС), на практике оказываются чувствительными к внешним воздействиям, сильно зашумленными, а также в некоторых случаях имеют накапливающуюся ошибку ориентации. Эффективный способ нивелирования шумов и накапливающейся ошибки ориентации заключается в использовании специализированных алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) путем комбинирования (комплексирования) показаний нескольких МЭМС-датчиков. Эффективная фильтрация сигналов МЭМС-датчиков является основой для повышения точности ориентации функциональных элементов ГТМ.

Сравнительный анализ комплексующих фильтров выделяет фильтр Маджвика в реализации MARG на фоне других фильтров. Данная реализация фильтра компенсирует магнитные искажения, выполняет коррекцию магнитного склонения и нивелирует дрейф МЭМС-гироскопа по оси рыскания. Для электрических ГТМ, построенных по схеме Варда–Леонарда, предлагается способ функционирования комплексующего фильтра Маджвика в реализации MARG посредством имитации работы магнетометра с помощью глобальной навигационной спутниковой системы.

**Ключевые слова:** горные технологические машины, микроэлектромеханические системы, инерциальный измерительный модуль, фильтр Калмана, фильтр Маджвика, система мониторинга и позиционирования, автоматизация, имитация магнетометра, навигационная спутниковая система.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-92-97

В добывающих отраслях промышленности предъявляются высокие требования к качеству функционирования горных технологических машин (ГТМ), на которых, как правило, отсутствуют регистрирующие устройства для мониторинга и позиционирования функциональных элементов ГТМ [1–3]. В литературе [1–3] доказываемся, что такие регистрирующие устройства успешно реализуются на основе современных микроэлектромеханических систем (МЭМС) – гироскопов и акселерометров.

Применение МЭМС-датчиков в инерциальных измерительных системах требует использования специализированных алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС). Одним из способов нивелирования шумов при ЦОС является комбинирование (комплексирование) показаний МЭМС-датчиков, нивелирующее их недостатки [3].

На базе МЭМС-датчиков и вычислительного устройства, реализующего алгоритмы ЦОС, формируется инерциальный измерительный модуль (ИИМ). ИИМ, состоящий из акселерометра и гироскопа, получил название AHRS (англ. Attitude and Heading Reference System – система определения пространственного положения), ИИМ, состоящий из акселерометра, гироскопа и магнетометра, получил название MARG (англ. Magnetic, Angular Rate, and Gravity – магнитная, угловая скорость и гравитация) [4]. ИИМ является частным случаем платформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) [5].

Из анализа алгоритмов работы фильтров [6] следует, что коррекция большинства комплексующих фильтров осуществляется за счет компонентов опорных векторов или гравитационных полей. Разнообразие комплексующих фильтров может быть представлено пятью основными типами:

1. Фильтр Калмана (Бьюси–Стратановича) и его модификации [7–9].
2. Комплементарный фильтр (композитный / альфа-бета, фильтр Калмана с фиксированной моделью и комплементарный фильтр второго порядка) [10–12].
3. Алгоритм направляющих косинусных матриц (фильтр Премерлани и Бизарда) [13].
4. Фильтр Махони [14].
5. Фильтр Маджвика [15].

Возможные модификации комплексующих фильтров [16] представляют собой вариации перечисленных выше основных типов фильтров и получили широкое распространение в любительских конструкциях (беспилотные летательные аппараты (дроны) и т.п.). В [3] решается задача разработки автоматизированной системы мониторинга и позиционирования (АСМП) функциональных элементов ГТМ для позиционирования, идентификации рабочих циклов и оценки параметров технологического процесса экскавации горной массы. В АСМП используются МЭМС-измерения динамических характеристик функциональных элементов ГТМ в режиме реального времени и обработка результатов с помощью специализированного программного обеспечения. Производственные испытания АСМП [3], выполненные в 2017 и 2018 гг., подтвердили эффективность АСМП и определили пути модернизации системы. Одним из главных направлений модернизации АСМП является повышение точности ориентации функциональных элементов ГТМ за счет эффективной фильтрации сигналов МЭМС-датчиков.

Общая постановка задачи разработки автоматизированной системы мониторинга и позиционирования (АСМП) функциональных элементов горных технологических машин (ГТМ) обсуждается в [1–3].

Далее рассматривается задача повышения точности ориентации функциональных элементов ГТМ за счет эффективной фильтрации сигналов МЭМС-датчиков: сравнительный анализ комплексирующих фильтров, обоснование выбора фильтра Маджвика в реализации MARG, проблемы его применения в АСМП ГТМ и их решение с помощью глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС).

### Сравнительный анализ комплексирующих фильтров

Самым популярным фильтром из вышеперечисленных является фильтр Калмана [7], получивший распространение во многих областях науки и техники. В [17] проведен сравнительный анализ фильтров Калмана и Маджвика в реализации AHRS [15], т.е. фильтра на основе акселерометра и гироскопа, для решения задачи фильтрации сигналов БИНС путем моделирования в среде «Matlab Simulink». Из результатов моделирования следует, что переходные процессы в фильтре Калмана протекают быстрее, чем в фильтре Маджвика в реализации AHRS. Ошибка фильтрации для фильтра Калмана также значительно меньше, чем для фильтра Маджвика, следовательно, установившиеся значения выходных сигналов в фильтре Калмана ближе к истинным значениям параметров ориентации объекта [17]. В нашей задаче объектом является ГТМ. В [3] проведено исследование комплексирующих фильтров, которое позволяет сделать более общие выводы:

1. Фильтр Калмана имеет широкую область применения, высокую достоверность показаний, хорошее качество фильтрации, оценивает и прогнозирует состояние системы, имеет множество возможных реализаций, позволяющих подобрать фильтр для определенной задачи.

Недостатки фильтра: сложен в настройке, для функционирования требуется быстродействующее вычислительное устройство, необходима высокая частота дискретизации, которая может превышать физические возможности объекта, обязательно наличие математической модели датчиков, избыточен для АСМП ГТМ.

2. Применение комплементарного фильтра первого и второго порядков нецелесообразно ввиду того, что фильтр не функционирует по оси рыскания.

3. Фильтр направляющих косинусных матриц оперирует матрицей поворота, что порождает проблему «шарнирного замка» – вырождения матрицы при повороте на 90° град, расчет кинематики и коррекция данных адаптированы для особенностей динамики летательных аппаратов. Алгоритм базируется на фильтре Махони.

4. Фильтр Махони значительно нивелирует ошибку ориентации по оси рыскания, но не устраняет ее полностью, по сути, представляет собой ПИ-регулятор [18]. Для фильтра характерны отсутствие дрейфа и перманентная ошибка ориентации, реализация MARG уступает точности реализации AHRS.

5. Фильтр Маджвика не выполняет коррекцию по оси рыскания без магнетометра, функционирующая

осуществляется по аналогии с работой комплементарного фильтра по осям крена и тангажа. Использование магнетометра эффективно нивелирует ошибку дрейфа нуля гироскопа и угловой ориентации по оси рыскания, т.е. разработка АСМП ГТМ должна быть основана на комплексирующем фильтре Маджвика в реализации MARG. Этот фильтр компенсирует магнитные дисторсии (искажения) и ошибки магнитного склонения вследствие отклонения чувствительного элемента от горизонта, корректирует дрейф гироскопа по оси рыскания.

### Фильтр Маджвика в реализации MARG

Особенностью фильтра Маджвика в реализации MARG является то, что он функционирует на основе показаний инерциальных датчиков (ускорение, угловая скорость) и характеристик магнитного поля Земли, оптимизирует свою работу на основе градиентного метода. Анализ показал, что этот фильтр – один из современных комплексирующих фильтров для определения ориентации в пространстве [15]. Схема фильтра в реализации MARG представлена на рис. 1.

Фильтр Маджвика использует кватернионы для описания пространственного положения объекта. Для понимания принципа работы фильтра Маджвика сделаем некоторые пояснения по рис. 1. Переменные, системы отсчета и векторы на этом рисунке индексируются надстрочными и подстрочными индексами, введенными Крэйгом в [19]: впереди стоящий нижний индекс соответствует базовой системе отсчета, а впереди стоящий верхний индекс – системе отсчета, относительно которой задана переменная. То есть индекс  $E$  обозначает координатную систему отсчета Земли, а индекс  $S$  – координатную систему отсчета датчика.

В блоке «Группа 1», выделенной на схеме фильтра на рис. 1, компенсируются магнитные искажения: контролируемое направление магнитного поля Земли  ${}^E\hat{h}_t$  в земных координатах в момент времени  $t$  рассчитывается как нормированное значение данных магнетометра  ${}^S\hat{m}_t$ :

$${}^E\hat{h}_t = \begin{bmatrix} 0 & h_x & h_y & h_z \end{bmatrix} = {}^S\hat{q}_{est,t-1} \otimes {}^S\hat{m}_t \otimes {}^E\hat{q}_{est,t-1}^*$$

Здесь  ${}^S\hat{q}_{est,t-1}$  – комплексирующая функция фильтра;  ${}^E\hat{q}_{est,t-1}^*$  – комплексно-сопряженная комплексирующая функция фильтра.

Ошибочный наклон корпуса магнетометра, как следствие неправильной проекции магнитного поля Земли на магнетометр в контролируемом направлении, корректируется при условии, если относительное направление магнитного поля Земли  ${}^E\hat{b}_t$  имеет одинаковый наклон в течение всего времени, что достигается расчетом ортогональных векторов  ${}^E\hat{b}_t$  и  ${}^E\hat{h}_t$  по оси крена и тангажа:

$${}^E\hat{b}_t = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{h_x^2 + h_y^2} & 0 & h_z \end{bmatrix}.$$

Данный способ коррекции нивелирует магнитные искажения по осям крена и тангажа, магнитные возмущения влияют только на курс (по оси рыскания).

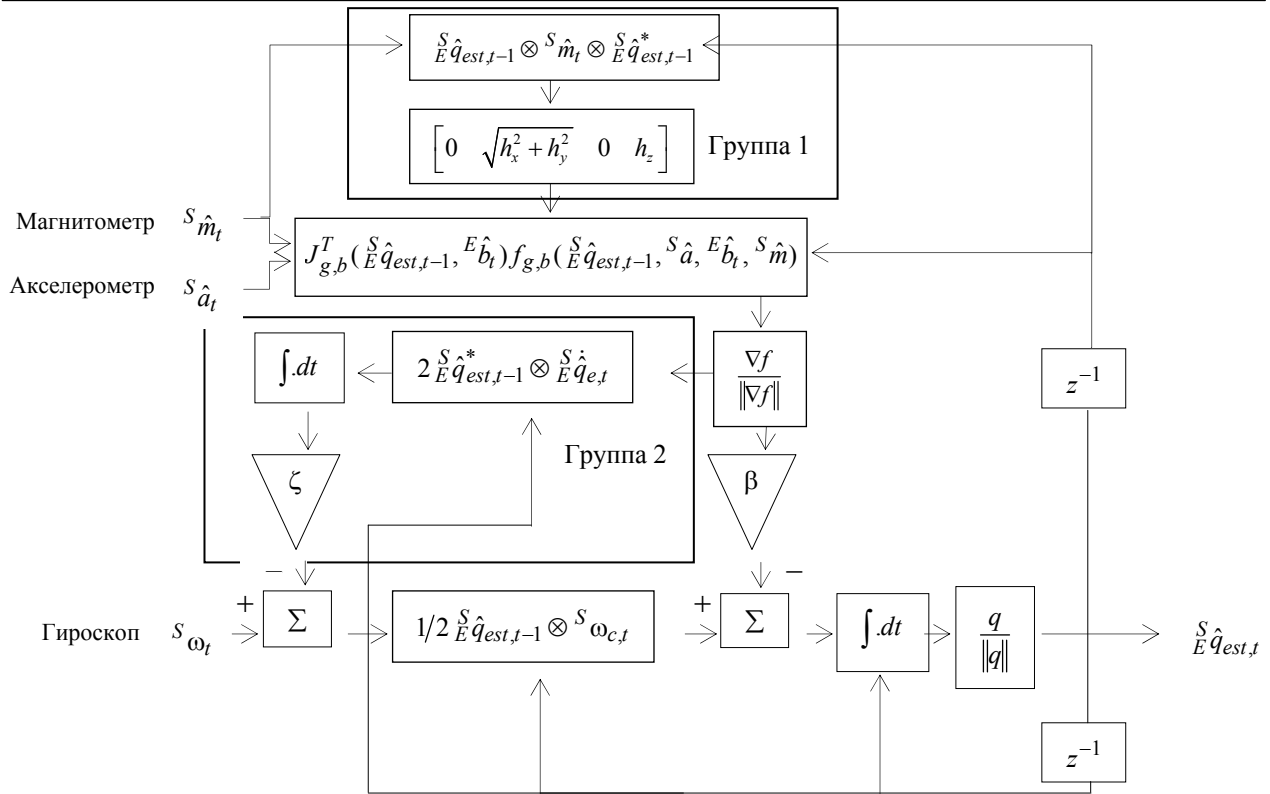


Рис. 1. Фильтр Маджвика в реализации MARG: группа 1 – коррекция магнитных искажений; группа 2 – коррекция дрейфа гироскопа

В блоке «Группа 2», выделенной на схеме фильтра на рис. 1, осуществляется коррекция дрейфа гироскопа. Смещение (дрейф) гироскопа может быть представлено как часть ошибки от скорости изменения ориентации  $\hat{q}_{e,t}$ :

$$S \omega_{e,t} = 2 \hat{q}_{est,t-1}^* \otimes \hat{q}_{e,t}$$

Дрейф гироскопа  $S \omega_b$  представлен как постоянная составляющая  $S \omega_e$ , которая может быть удалена, так как часть  $S \omega_e$  является средневзвешенным с соответствующим коэффициентом усиления  $\zeta$ :

$$S \omega_{b,t} = \zeta \sum_t S \omega_{e,t} \Delta t,$$

$$S \omega_{c,t} = S \omega_t - S \omega_{b,t}.$$

Скомпенсированные измерения гироскопа  $S \omega_c$  могут быть использованы вместо исходных измерений гироскопа.

Фильтр Маджвика в реализации MARG (см. рис. 1) имеет два коэффициента усиления:

- коэффициент  $\beta$  представляет суммарные ошибки гироскопа, представленные как величина производной кватерниона;

- коэффициент усиления  $\zeta$  характеризует скорость сходимости для нивелирования ошибок измерений гироскопа, не связанных с нулем, выражен как производная кватерниона.

Данные ошибки характеризуют смещение гироскопа. Коэффициенты представлены как угловые

величины, где  $\omega_b$  – оценка средней погрешности измерения дрейфа гироскопа по каждой оси,  $\omega_e$  – расчетная скорость дрейфа гироскопа в каждой оси. Коэффициент усиления  $\beta$  рассчитывается по следующей формуле:

$$\beta = \left\| \frac{1}{2} \tilde{q} \otimes \begin{bmatrix} 0 & \tilde{\omega}_\beta^k & \tilde{\omega}_\beta^m & \tilde{\omega}_\beta^p \end{bmatrix} \right\| = \sqrt{\frac{3}{4}} \tilde{\omega}_\beta, \tag{1}$$

где  $\tilde{q}$  – единичный (базисный) кватернион.

Коэффициент усиления  $\zeta$  рассчитывается по формуле

$$\zeta = \sqrt{\frac{3}{4}} \tilde{\omega}_\zeta. \tag{2}$$

Фильтр Маджвика в реализации MARG использует систему гиперкомплексных чисел (кватернионы), которую можно корректировать показаниями акселерометра и гироскопа при выполнении аналитических вычислений. Система гиперкомплексных чисел оптимизируется методом градиента для расчета вектора направления погрешности гироскопа в виде производной системы гиперкомплексных чисел. Оптимизация работы методом градиента позволяет задавать режим работы фильтра Маджвика в реализации MARG двумя коэффициентами, которые можно корректировать в процессе работы. Невысокие требования к вычислительному устройству позволяют реализовать АСМП на отечественных МК или ПЛИС.

Отличительные особенности фильтра Маджвика в реализации MARG:

- два регулируемых параметра, рассчитываемых на основе реакции системы по формулам (1) и (2);
- высокая эффективность при небольших частотах дискретизации;
- высокая производительность (277 арифметических операций на каждую итерацию обновления фильтра).

Применение кватерниона для ориентации в трехмерном пространстве позволяет избежать проблемы «шарнирного замка» (складывание рамок или gimbal lock), связанных с углами Эйлера–Крылова.

Фильтр позволяет компенсировать дрейф гироскопа и магнитные искажения в текущий момент работы. Ошибка ориентации рассчитывается с помощью метода градиента.

Комплексирование данных, полученных с датчиков, выполняется с помощью пропорционального звена и дискретного интегрирования, углы Эйлера–Крылова используются в качестве опорных координат, относительно которых рассчитывается ошибка скорости вращения.

#### Имитация магнетометра посредством ГНСС

ГТМ (драглайны и мехлопаты) являются электрическими машинами, поэтому функционирование магнетометра (электронного компаса) крайне затруднительно из-за возникающих магнитных дисторсий, исходящих от металлических частей конструкции и силовых агрегатов. Функционирование ИИМ АСМП в комплектации с магнетометром на гидравлических ГТМ (карьерный буровой станок) показало возможность применения фильтра Маджвика в реализации MARG (с магнетометром): достаточно рассчитать поправку в зависимости от места установки магнетометра и выполнять периодическую калибровку. Для электрических ГТМ предлагаемое решение состоит в имитации работы магнетометра для фильтра Маджвика посредством определения курса (истинного путевого угла) при помощи глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Определение путевого угла с помощью ГНСС позволит имитировать показания магнетометра и сделает возможным выполнить коррекцию фильтра Маджвика, а также вести альманах угловых перемещений ГТМ относительно путевого угла. Имитацию можно осуществить двумя способами:

1) использование одного приёмника ГНСС, установленного на максимально возможном удалении от центра вращения ГТМ –  $L$  с последующим накоплением массива координат;

2) использование двух приёмников ГНСС для работы в дифференциальном режиме, при котором один приемник ГНСС устанавливается непосредственно в центре вращения ГТМ и служит опорной станцией, а второй приемник устанавливается на максимально возможном удалении от центра вращения ГТМ. Применение двух приемников ГНСС формирует две точки, по которым определяется прямая, указывающая угол азимута.

Первый способ установки приемника ГНСС представлен на рис. 2; второй способ – на рис. 3.

В [3] использован первый способ установки приемника ГНСС. Он располагался на расстоянии 9,9 м от геометрического центра вращения ГТМ. При расчетах расстояние  $L$  принимается равным 10 м. Первый способ установки приемника ГНСС требует определения координат центра вращения ГТМ, и вычисление путевого угла сводится к решению обратной пространственной задачи [3]. Использование двух приемников ГНСС (второй способ) значительно упрощает определение путевого угла.

Кроме этого, дифференциальный режим позволяет значительно повысить точность определения благодаря одинаковому влиянию искажений сигнала ГНСС, создаваемых ионосферой и тропосферой на близко расположенные приемники.

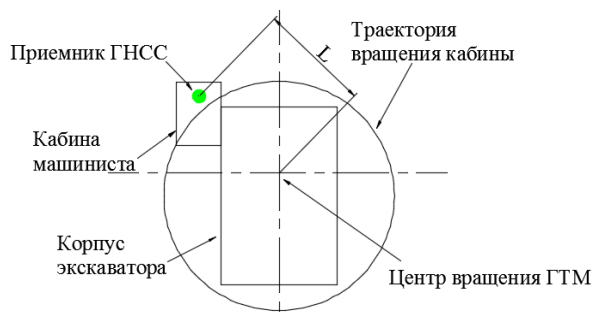


Рис. 2. Имитация магнетометра посредством накопления массива координат движения кабины

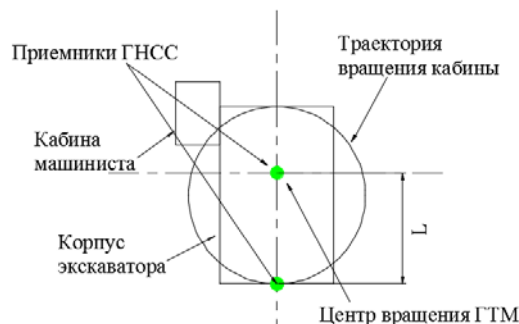


Рис. 3. Имитация магнетометра посредством определения азимута, заданного двумя приемниками ГНСС

Применение двух приемников ГНСС позволяет также реализовать высокоточный фазовый метод определения координат относительно базовой станции RTK (Real Time Kinematics – кинематика реального времени) или DGPS (Differential Global Positioning System – дифференциальная коррекция). Данная реализация потребует увеличения вычислительной мощности АСМП, наличия операционной системы, функционирующей в реальном времени, и специализированной библиотеки глобального навигационного спутникового позиционирования [20].

#### Выводы

Задача повышения точности ориентации функциональных элементов ГТМ успешно решается фильтрацией сигналов МЭМС-датчиков (акселерометра, гироскопа и магнетометра) комплексированным фильтром Маджвика в реализации MARG. Функционирование магнетометра (электронного

компаса) на ГТМ затруднено постоянно возникающими магнитными дисторсиями, исходящими от металлических частей конструкции ГТМ и силовых агрегатов. Эффективное решение этой проблемы состоит в имитации работы магнетометра для фильтра Маджвика с помощью глобальной навигационной спутниковой системы.

#### Литература

1. Мещеряков Я.Е. Автоматизация контроля положения платформы карьерного бурового станка / Я.Е. Мещеряков, А.М. Кориков // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 94–97.
2. Мещеряков Я.Е. Автоматизированный мониторинг работы экскаватора в условиях угольного разреза // Вестник КузГТУ. – 2015. – №4. – С. 121–125.
3. Мещеряков Я.Е. Автоматизация процессов мониторинга и позиционирования функциональных элементов горных технологических машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2018. – 20 с.
4. Madgwick S.O.H. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm / S.O.H. Madgwick, A.J.L. Harrison, R. Vaidyanathan // Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on. – 2011. – P. 1–7.
5. Бранец В.Н. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. – М.: Наука, 1992. – 280 с.
6. IMU Data Fusing: Complementary, Kalman, and Mahony Filter. URL: <http://www.olliw.eu/2013/imu-data-fusing/> (дата обращения: 23.05.2018).
7. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of Basic Engineering. – 1960. – No. 82. – P. 35–45.
8. Foxlin E. Inertial head-tracker sensor fusion by a complementary separate-bias Kalman filter // Virtual Reality Annual International Symposium, 1996. Proceedings of the IEEE 1996. – 1996. – P. 185–194.
9. Sabatini A.M. Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2006. – Vol. 53, No. 7. – P. 1346–1356.
10. Bachmann E.R. Orientation tracking for humans and robots using inertial sensors / E.R. Bachmann, I. Duman, U.Y. Usta et al. // Proc. of 1999 International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Monterey, CA, December, 1999. – P. 187–194.
11. Fusion of data from quadcopter's inertial measurement unit using complementary filter. – URL: [http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/116099/IMU\\_data\\_processing\\_final.pdf?sequence=2&isAllowed=y](http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/116099/IMU_data_processing_final.pdf?sequence=2&isAllowed=y). (дата обращения: 23.05.2018).
12. Wu J. et al. Fast complementary filter for attitude estimation using low-cost MARG sensors // IEEE Sensors Journal. – 2016. – Vol. 16, No. 18. – P. 6997–7007.
13. Direction cosine matrix IMU: Theory. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/265755808\\_DCM\\_IMU\\_Theory](https://www.researchgate.net/publication/265755808_DCM_IMU_Theory) (дата обращения: 23.05.2018).
14. Mahony R. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group / R. Mahony, T. Hamel, J.M. Pflimlin // IEEE Transactions on automatic control. – 2008. – Vol. 53, No. 5. – P. 1203–1218.
15. Madgwick S. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays // Report x-io and University of Bristol (UK). – 2010. – Vol. 25. – P. 113–118.
16. Project-specific collection of technical information. – URL: <https://lewpayne.blogspot.com/2010/06/oteher.html>. (дата обращения: 23.05.2018).
17. Яцына Ю. Сравнительный анализ дискретных фильтров Калмана и Маджвика / Ю. Яцына, Ю. Гриднев, А. Шведко // Наука и инновации. – 2017. – № 2 (168). – С. 22–24.
18. Кориков А. М. Основы теории управления: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. – Томск: НТЛ, 2002. – 392 с.
19. Craig John J. Introduction to Robotics Mechanics and Control. – Pearson Education International, 2005. – 400 p.
20. RTKLIB ver. 2.4.2 Manual [Электронный ресурс] / Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – URL: [http://www.rtklib.com/prog/manual\\_2.4.2.pdf](http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf) – RTKLIB ver. 2.4.2 Manual (дата обращения: 05.11.2018).

#### Кориков Анатолий Михайлович

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. АСУ ТУСУРа  
вед. науч. сотр. Томского ф-ла  
Института вычислительных технологий СО РАН  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 41-42-79  
Эл. почта: korikov@asu.tusur.ru

#### Мещеряков Ярослав Евгеньевич

Аспирант ТУСУРа  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-906-937-22-09  
Эл. почта: M.YarosLove@yandex.ru

Korikov A.M., Meshcheryakov Y.E.

#### Orientation of mining technology machines based on microelectromechanical systems

The orientation parameters of mining process machines (MMM), determined using MEMS sensors, in practice are sensitive to external influences and very noisy, and in some cases there is an orientation error accumulating. An effective way to level noise and cumulative orientation errors is to use specialized digital signal processing (DSP) algorithms by combining (complexing) the readings of several MEMS sensors. Effective filtering of MEMS sensor signals is the basis for improving the accuracy of orientation of the functional elements of geological and technical measures. Comparative analysis of complexing filters highlights the Madgwick filter in the MARG implementation, compared to other filters. This implementation of the filter compensates for magnetic distortion, corrects the magnetic declination, and levels the drift of the MEMS gyro along the yaw axis. For electric geological and technical measures built according to the Ward-Leonard scheme, a method is proposed for the functioning of the Madgwick complexing filter in the implementation of MARG by simulating the operation of a magnetometer using a global navigation satellite system.

**Keywords:** mining technological machines, microelectromechanical systems, inertial measuring module, Kalman filter, Madgwick filter, monitoring and positioning system, automation, magnetometer imitation, navigation satellite system.  
**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-4-92-97

#### References

1. Meshcheryakov Ya. E. Automation of control of the position of the platform of an open-pit drilling rig /

Ya.E. Meshcheryakov, A.M Korikov // Proceedings of TUSUR University. – 2016. – Vol. 19, No. 3. – P. 94–97.

2. Meshcheryakov Ya.E. Automated monitoring of excavator operation under coal mine conditions // Vestnik KuzGTU. – 2015. – №4. – P. 121–125.

3. Meshcheryakov Ya. E. Automation of the monitoring and positioning of the functional elements of mining technological machines. Avtoreferat Diss. ... kand. techn. nauk. Tomsk, 2018. – 20 p.

4. Madgwick S.O.H. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm / S.O.H. Madgwick, A.J.L. Harrison, R. Vaidyanathan // Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on. – 2011. – P. 1–7.

5. Branets V.N. Introduction to the theory of free-form inertial navigation systems / V.N. Branets, I.P. Shmyglevsky. – M.: Science, 1992. – 280 p.

6. IMU Data Fusing: Complementary, Kalman, and Mahony Filter. URL: <http://www.olliw.eu/2013/imu-data-fusing/>. (accessed: May 23, 2018).

7. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of Basic Engineering, 1960, No. 82, p. 35–45.

8. Foxlin E. Inertial head-tracker sensor fusion by Kalman filter // Virtual Reality Annual International Symposium, 1996. Proceedings of the IEEE 1996. 1996, p. 185–194.

9. Sabatini A.M. Quaternion – based extended Kalman filtering for filtering // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2006, vol. 53, no. 7, p. 1346–1356.

10. Bachmann E.R. Orientation tracking for humans and robots using inertial sensors / E.R. Bachmann, I. Duman, U.Y. Usta et al. // Proc. of 1999 International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Monterey, CA, December, 1999, pp. 187–194.

11. Fusion of data from quadcopter's inertial measurement unit using complementary filter. URL: [http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/116099/IMU\\_data\\_processing\\_final.pdf?sequence=2&isAllowed=y](http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/116099/IMU_data_processing_final.pdf?sequence=2&isAllowed=y). (accessed: May 23, 2018).

12. Wu J. et al. Fast complementary filter for attitude estimation using low-cost MARG sensors // IEEE Sensors Journal. 2016, т. 16, no. 18, h. 6997–7007.

13. Direction cosine matrix IMU: Theory. URL: [https://www.researchgate.net/publication/265755808\\_DCM\\_IMU\\_Theory](https://www.researchgate.net/publication/265755808_DCM_IMU_Theory). (accessed: May 23, 2018).

14. Mahony R. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group / R. Mahony, T. Hamel, J.M. Pflimlin // IEEE Transactions on automatic control, 2008, vol. 53, no. 5, p. 1203–1218.

15. Madgwick S. An efficient orientation filter for inertial and inertial / magnetic sensor arrays // Report x-io and University of Bristol (UK), 2010, vol. 25, p. 113–118.

16. Project – specific collection of technical information. URL: <https://lewpayne.blogspot.com/2010/06/oteher.html>. (accessed: May 23, 2018).

17. Yatsyna Yu. Comparative analysis of discrete Kalman and Madgwick filters / Yu. Yatsyna, Yu. Gridnev, A. Shvedko // Science and Innovations, 2017, no. 2 (168), p. 22–24.

18. Korikov A.M. Fundamentals of management theory: studies. manual for universities, 2nd ed. Tomsk: NTL, 2002, 392 p.

19. Craig John J. Introduction to Robotics Mechanics and Control. Pearson Education International, 2005, 400 h.

20. RTKLIB ver. 2.4.2 Manual. [Electronic resource]. Systems Requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://www.rtklib.com/prog/manual\\_2.4.2.pdf](http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf) – RTKLIB ver. 2.4.2 Manual. (accessed: November 05, 2018).

---

#### **Anatoly M. Korikov**

Doctor of Engineering, Assistant Professor, Head of the Department of Automated Control Systems Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050;  
Leading researcher at Tomsk Branch of the Institute of Computing Technologies SB RAS  
Phone: +7 (382-2) 41-42-79  
Email: korikov@asu.tusur.ru

#### **Yaroslav E. Meshcheryakov**

PhD student, Department of Automated Control Systems Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-906-937-22-09  
Email: M.YarosLove@yandex.ru