

УДК 621.863.2:681.586.7

ВЫБОР ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА

А.Г. Гурко, доц., к.т.н., А.П. Плахтеев, доц., к.т.н., П.А. Плахтеев, мл. науч. сотр.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Выполнен анализ датчиков, применяющихся в системах автоматического управления рабочим оборудованием экскаваторов. В качестве наиболее рационального решения предложен потенциометрический датчик. Рассмотрены процедуры калибровки и линеаризации характеристики потенциометрических датчиков.

Ключевые слова: автоматизированный экскаватор, датчик, калибровка, линеаризация.

ВИБІР ДАТЧИКА ПОЛОЖЕННЯ РОБОЧОГО ОБЛАДНАННЯ ЕКСКАВАТОРА

О.Г. Гурко, доц., к.т.н., А.П. Плахтеев, доц., к.т.н., П.А. Плахтеев, мл. науч. співр.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Виконано аналіз датчиків, що застосовуються в системах автоматичного керування робочим обладнанням экскаваторів. Як найбільш раціональне рішення запропоновано потенціометричний датчик. Розглянуто процедури калібрування і линеаризації характеристики потенціометричних датчиків.

Ключові слова: автоматизований экскаватор, датчик, калібрування, линеаризація.

SELECTING OF THE SENSOR FOR EXCAVATOR WORK EQUIPMENT POSITION

A. Gurko, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.), A. Plahteev, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.),
P. Plahteev, J. Researcher,
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. Analysis of sensors that are used in automated excavators is carried out. A potentiometric sensor as the most rational solution has been offered. The procedures of calibration and linearization of potentiometric sensors characteristics are considered.

Key words: automated excavator, sensor, calibration, linearization.

Введение

Повышение качества и снижение себестоимости строительных и дорожных работ требуют более широкого внедрения систем автоматизации соответствующих машин, одной из наиболее распространенных среди которых является одноковшовый экскаватор с гидравлическим приводом. Развитие систем автоматического управления экскаваторами стимулируется не только постоянным уже-

сточением требований к производительности и эффективности их использования, но и необходимостью сокращения нагрузок на оператора и обеспечения его безопасности. Последнее особенно важно при работе в местах, опасных для человека, например, при ликвидации чрезвычайных ситуаций, захоронении опасных отходов и проч.

Автоматизации экскаваторов посвящено достаточно большое количество исследований

[1–10]. Однако большинство из них направлено на синтез законов управления движением звеньев рабочего оборудования (РО), т.е. стрелой, рукоятью и ковшом, и практически не рассматривались вопросы выбора технических средств для реализации таких систем управления и, в частности, датчиков наклона и поворота платформы, углового положения РО. В то же время от типа используемых датчиков во многом зависят такие характеристики системы управления, как точность, надёжность, сложность и быстродействие вычислительных средств.

Таким образом, исследования, ориентированные на обоснованный выбор датчиков для системы управления экскаватором, являются актуальными.

Цель и постановка задачи

На экскаваторах используются три широких класса датчиков [11]. Один класс позволяет определить положение самой машины как относительно некоторой локальной системы координат, так и относительно фиксированной глобальной системы координат. Другой класс предназначен для восприятия окружающей среды вокруг экскаватора. Третий класс датчиков измеряет текущие значения параметров движения (обычно положения в локальной системе координат) звеньев РО экскаватора (рис. 1) и предназначен для реализации обратной связи при управлении движением РО по заданной траектории с требуемой точностью.

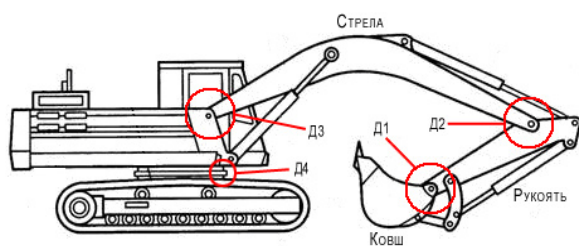


Рис. 1. Расположение датчиков РО экскаватора: Д1 – датчик положения ковша; Д2 – датчик положения рукояти; Д3 – датчик положения стрелы; Д4 – датчик положения базы экскаватора

Выбор датчиков положения РО экскаватора – непростая задача, т.к. приходится учитывать не только их точность и стоимость, но и такие параметры, как виброустойчивость, возможность работы в агрессивных средах при

значительных перепадах температуры и влажности.

Целью данной работы является анализ технических характеристик датчиков, применяемых при управлении РО экскаватора, и выбор наиболее рационального решения по критерию точности в заданных условиях эксплуатации при ограничениях на стоимость и эксплуатационные затраты.

Поскольку большинство существующих экскаваторов имеют РО с вращающимися сочленениями, то ниже будут рассматриваться лишь датчики углового положения.

Анализ публикаций

До недавнего времени одним из наиболее распространенных методов измерения положения звеньев РО экскаваторов было использование датчиков положения внутри исполнительных гидроцилиндров [7–9]. Преимущество таких датчиков в их надёжности, а недостаток – в том, что результаты измерения могут быть сильно зашумлены [11].

Альтернативным подходом является установка датчиков прямо на звеньях РО. Например, существуют решения, основанные на определении перемещений звеньев путем быстрой обработки информации от видеокamer [12]. Однако вследствие необходимости применения сложных алгоритмов обработки изображений они не нашли широкого распространения.

Еще одним типом датчиков, устанавливаемых на экскаваторах, являются излучающие датчики, преимущественно лазерные [2, 13, 14]. Помимо определения положения звеньев РО, такие датчики применяют для привязки машины к местности при решении задач автономной навигации или при выборе места копания. Однако распространение лазерных датчиков ограничивается снижением эффективности их работы при наличии пыли, обычной на строительных площадках, или во время атмосферных осадков.

В последнее время для измерения положения РО строительных и дорожных машин широко используются акселерометры. Эти датчики устанавливают такие известные производители систем автоматизации дорожной техники, как Topcon, Trimble и Leica [13, 14].

Основной проблемой при использовании акселерометра на экскаваторах является существенное влияние на результаты измерений вибраций. Для компенсации этого влияния реализуют различного вида программные (цифровые фильтры) и схемные решения. Например, в работе [6] предлагается метод измерения углов поворота, основанный на обработке сигналов от пары акселерометров, расположенных на смежных звеньях. Тем не менее, шум акселерометров остается серьезной проблемой.

Кроме приведенных выше, в качестве датчиков перемещения звеньев РО экскаваторов используются энкодеры [5], а также параметрические емкостные, индуктивные и потенциометрические датчики [10, 15–17].

Именно на исследование эффективности применения последних датчиков при определении положения звеньев РО экскаватора направлена данная работа.

Анализ основных характеристик датчиков

Рассмотрим преимущества и недостатки применения потенциометрических, емкостных и индуктивных датчиков, а также оптического энкодера в системах управления движением РО экскаваторов. Основные характеристики датчиков сведены в табл. 1.

Таблица 1 Сравнительная таблица характеристик различных типов датчиков

Характеристики	Потенциометрические	Емкостные	Индуктивные	Оптические
Высокая точность	+	+	+	+
Высокая линейность	–	+	+	+
Низкое энергопотребление	+	+	–	+
Низкая стоимость	+	–	–	–
Чувствительность к внешним воздействиям	электрические шумы	электромагнитные поля	электромагнитные поля	вибрации, удары, запыленность, влажность

Потенциометрический датчик представляет собой проволочный или пленочный переменный резистор, к которому приложено питающее напряжение. Его входной величиной является линейное или угловое перемещение токосъемного контакта, а выходной – напряжение, снимаемое с этого контакта и зависящее от его положения. Преимущества потенциометрических датчиков:

- простота конструкции;
- малые габариты и вес;
- малая стоимость;
- стабильность характеристик;
- возможность работы на переменном и постоянном токе.

К их недостаткам относят:

- наличие скользящего контакта, который может стать причиной отказов из-за механического износа или окисления контактной дорожки;
- ограниченное разрешение проволочного датчика, определяемое числом витков резистивного элемента;
- погрешность в работе за счет тока нагрузки;
- сравнительно небольшой коэффициент преобразования;
- высокий порог чувствительности;
- наличие шумов, связанных с наличием переходных сопротивлений между подвижным контактом и пленочной поверхностью, либо витками резистивного элемента.

Потенциометры в качестве датчиков положения находят широкое применение не только в дорожно-строительной, но и в автомобильной технике (например, датчик положения дроссельной заслонки), и имеют наработку на отказ больше, чем срок эксплуатации машины [18].

В емкостном датчике изменение измеряемой величины преобразуется в изменение емкости конденсатора. Сравнительно новыми приборами, доведенными до широкого промышленного применения в последние годы, стали малогабаритные емкостные инклинометры с электрическим выходным сигналом, пропорциональным углу наклона датчика [19, 20]. Емкостные датчики обладают рядом преимуществ:

- малое потребление энергии;
- малые усилия подвижной части;
- простота изготовления;
- малая стоимость;
- высокая точность;

- стабильность работы;
- широкий диапазон регулирования.

Недостатками этих датчиков являются:

- сравнительно небольшой коэффициент передачи;
- высокое внутреннее сопротивление;
- высокие требования к конструкции;
- необходимость работы на повышенной частоте;
- сильное влияние внешних электромагнитных полей.

Индуктивный датчик представляет собой устройство, выходной электрический сигнал которого пропорционален перераспределению магнитного потока возбуждения, вызванному перемещением ротора. Поскольку амплитуда сигнала во вторичной обмотке зависит от потокосцепления, по величине амплитуды вторичной обмотки можно судить о положении ротора, а значит и о положении внешнего объекта.

Достоинства индуктивных датчиков [19, 20]:

- простота и прочность конструкции, отсутствие скользящих контактов;
- возможность подключения к источникам промышленной частоты;
- относительно большая выходная мощность (до десятков ватт);
- малые габариты и масса.

Недостатки индуктивных датчиков:

- точность работы зависит от стабильности частоты питающего напряжения;
- возможность работы только на переменном токе;
- ограниченный диапазон линейности статической характеристики;
- трудность регулирования;
- необходимость экранирования обмотки датчика.

Оптический энкодер представляет собой высокоточное электронно-механическое устройство, имеющее относительно малую устойчивость к неблагоприятным условиям эксплуатации и высокую стоимость. Обычно имеют цифровой интерфейс.

Основными достоинствами оптических энкодеров являются высокая точность и малая чувствительность к электромагнитным помехам. В то же время они чувствительны к вибрациям и ударам; плохо работают в запылен-

ной, загазованной и влажной среде; подвержены помехам от электрооборудования машин [20]. Относительно высокая стоимость энкодеров не является решающим фактором на фоне стоимости экскаватора, однако при усовершенствовании парка машин путем установки систем управления влияние стоимости энкодеров может оказаться существенным.

Несмотря на то, что большинство современных датчиков имеют высокие качественные показатели (табл. 1), стоит более детально остановиться на потенциометрических датчиках, так как они более предпочтительны по совокупности параметров, к которым относятся:

- весогабаритные (вес, типоразмер, диаметр корпуса, присоединительные размеры);
- механические (крутящий момент, число циклов, диапазон перемещений);
- электрические (резистивный элемент, номинальное сопротивление, линейность, разрешение (число витков), рассеиваемая мощность, число датчиков на одном валу (1–6), вид и уровень выходного сигнала);
- степень защиты до IP65 и выше (6 – полная защита от пыли, 5 – от водяных струй).

Как показывает практика, статическая характеристика потенциометрических датчиков может значительно отличаться от линейной. Предельный разброс линейности зависит от функционального угла, полного сопротивления и размера дорожек пленочных потенциометров [21]. Поэтому для успешного функционирования системы управления необходимо провести калибровку датчиков.

Калибровка потенциометрического датчика

Калибровка заключается в установлении зависимости между показаниями датчика и размером измеряемой (входной) величины (рис. 2) и необходима из-за разброса параметров потенциометрических датчиков при повышенных требованиях к точности. Данные калибровки используются при линеаризации характеристики потенциометров в интеллектуальных датчиках [17].

Калибровка выполняется следующим образом (рис. 2). Изменение положения вала шагового двигателя (ШД) от 0° до 310–350° передается на вал потенциометрического

датчика (R). Микрошаговые режимы многофазных ШД позволяют получить точность углового позиционирования 0,25–0,5°.

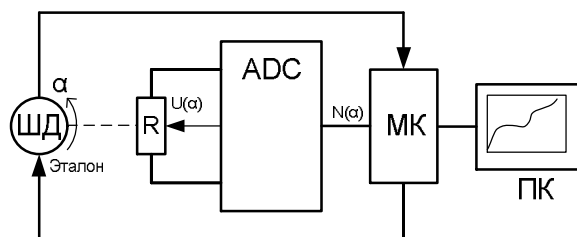


Рис. 2. Схема калибровки потенциометрических датчиков

Данные об изменении угла поворота ШД поступают на микроконтроллер (МК), а с потенциометра – на вход АЦП (ADC). Полученные с АЦП кодовые значения N (табл. 2) поступают на микроконтроллер, где сопоставляются с номинальными значениями от шагового двигателя и передаются на ПК для построения характеристики преобразования в графическом (рис. 3) и табличном виде.

Таблица 2 Таблица экспериментальных данных

Угол, град.	N	Угол, град.	N	Угол, град.	N
0	0	90	162	180	746
10	0	100	228	190	807
20	0	110	289	200	870
30	0	120	356	210	924
40	18	130	423	220	951
50	33	140	488	230	970
60	52	150	554	240	989
70	73	160	619	250	1004
80	103	170	683	260	1016

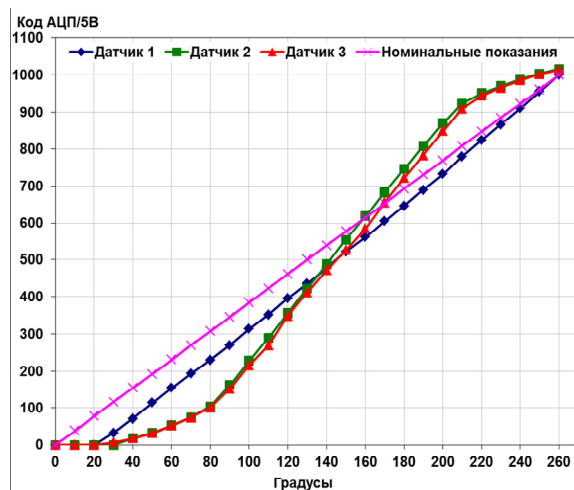


Рис. 3. График линейности трёх однотипных потенциометрических датчиков

Каждый из экземпляров однотипных потенциометрических датчиков имеет индивидуальную характеристику, существенно отличающуюся от номинальной (рис. 3), что является их основным недостатком. Эта проблема решается путём линейризации характеристик с помощью микроконтроллеров.

Линеаризация статической характеристики датчика

Для построения характеристики преобразования датчика при достаточно малом шаге табличного представления (табл. 2) может использоваться линейная интерполяция для нахождения величины $y(x)$ в соответствии с известным соотношением

$$\frac{y - f(x_0)}{f(x_1) - f(x_0)} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}, \quad (1)$$

где $x_0 \leq x \leq x_1$.

Шаг таблиц данных может быть фиксированным (табл. 2) или переменным.

Характеристика преобразования, построенная по экспериментальным данным с учетом шага квантования по уровню в АЦП, имеет ярко выраженный нелинейный характер (рис. 4, кривая 1). Кривая 2 на рис. 4 отображает приращения значений кода, снимаемого с АЦП, которые соответствуют конкретным значениям углов.

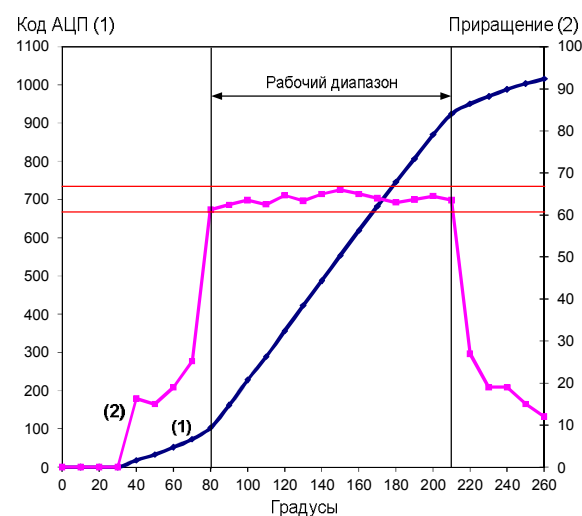


Рис. 4. Рабочий участок потенциометрического датчика

Анализируя представленные на рис. 4 зависимости, можно выделить практически ли-

нейный участок характеристики потенциометрического датчика. Работа датчика будет предпочтительна в этом рабочем диапазоне значений углов. Небольшая нелинейность характеристики в этом диапазоне устраняется программно относительно несложными расчетами на основе выражения (2)

$$y = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} (x - x_0). \quad (2)$$

Современные микроконтроллеры со встроенными или внешними АЦП способны выполнять указанные преобразования в реальном масштабе времени.

Выводы

В работе решена актуальная задача выбора датчика положения для системы управления движением РО гидравлического экскаватора.

Исходя из полученных результатов исследования, наиболее рациональным является использование потенциометрических датчиков. Хотя они и уступают в долговечности другим датчикам, но этот разрыв стремительно сокращается.

Немаловажными качествами потенциометрических датчиков является то, что они имеют малое энергопотребление и весогабаритные параметры. В системах, где требуется множество таких устройств, это преимущество вырастает многократно. При построении высоконадёжных резервированных интеллектуальных датчиков для измерения положения РО экскаватора можно использовать несколько потенциометров, связанных с одним сочленением. При этом также упрощается процедура фильтрации шумов.

Такие недостатки потенциометрических датчиков, как нелинейность и неповторяемость статических характеристик, устраняются применением рассмотренных в данной работе методов.

Литература

1. Jun Gu. Improved control of intelligent excavator using proportional-integral-plus gain scheduling / Gu Jun, D. Seward // *Journal of Central South University*. – 2012. – Vol. 19, № 2. – P. 384–392.

2. Sergiyenko O.Yu. Optimal Kinematic Control of a Robotic Excavator with Laser TVS feedback/O.Yu. Sergiyenko, D.Hernandez-Balbuena, A.G. Gurko et al. // *Proc. of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Vienna, Austria, 10–14 November, 2013. – P. 4239–4244.
3. Кириченко И.Г. Регулятор с вычисляемым моментом для управления рабочим оборудованием экскаватора // И.Г. Кириченко, А.Г. Гурко / *Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування: сб. науч. тр.: Серія «Підйомно-транспортні, будівельні і дорожні машини і обладнання»*. – 2013. – С. 210-220.
4. Wu Z. Design an Autonomous Excavation System for Hydraulic Excavators/ Z. Wu, K.Y. Sun, M. Song, M. Zheng // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – Vol. 437. – P. 471–474.
5. Seward D. LUCIE the robot excavator-design for system safety / D. Seward, F. Margrave // *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – IEEE, 1996. – Vol. 1. – P. 963–968.
6. Ghassemi F. An accelerometer-based joint angle sensor for heavy-duty manipulators / F. Ghassemi, S. Tafazoli, P.D. Lawrence, K. Hashtrudi-Zaad // *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'02*. – 2002. – Vol. 2. – P. 1771–1776.
7. Peussa P. Using solenoid valves for proportional pilot pressure control in miniexcavators / P. Peussa, D. Chan, S. Bachmann et al // *Proc. of the 4th Scandinavian International Conference*. – 1995. – P. 1139–1151.
8. Corke P. Sensors and Control for Mining Robotics / P. Corke, J. Roberts, G. Winstanley // *Proc. of the 4th International Symposium on Mine Mechanisation and Automation*, Brisbane, Australia, 6–9 July 1997. – B1.11–21.
9. Yang S.Y. Measuring system for development of stroke-sensing cylinder for automatic excavator / S.Y. Yang et al. // *Proc. Industrial Electronics, IEEE Transactions on*. – 1998. – Vol. 45, № 3. – P. 376–384.
10. Shao H. Automatic excavation planning of hydraulic excavator / H. Shao, H. Yamamoto et al // *Intelligent Robotics and Applications*. – 2008. – P. 1201–1211.
11. Sanjiv S. The state of the art in automation of earthmoving / S. Sanjiv // *Journal of Aerospace Engineering*. – 1997. – Vol. 10, № 4. – P. 1–29.

12. Mulligan I.J. A model-based vision system for manipulator position sensing / I.J. Mulligan, A.K. Mackworth, P.D. Lawrence // Proc. of the Workshop on Interpretation of 3D Scenes. – IEEE, 1989. – P. 186–193.
13. Калабин Е. Копать с умом. Системы управления экскаваторами Topcon 3Dxi / Е. Калабин // Строительная техника и технологии. – 2007. – № 2. – С. 106–112.
14. Leica PowerDigger 3D. The future of excavating. [Electronic Resource]. – Mode of access: URL: <http://www.leicageo-systems.com/downloads123/zz/machine/PowerDigger3D/brochures/PowerDigger3DBROen.pdf>
15. Shaban E.M. Development of an automated verticality alignment system for a vibration / E.M. Shaban, S. Ako et al. // Automation in Construction. – 2008. – Vol. 17, № 5. – P. 645–655.
16. Murakami T. Precision Angle Sensor Unit for Construction Machinery / T. Murakami, M. Kato, M. Ota // SAE Technical Paper. – 1997. – № 972782.
17. Precision Rotary Potentiometer. [Electronic Resource]. – Mode of access: URL: <http://www.fernsteuergeraete.de/en/product-range/precision-rotary-potentiometer.html> – Title from screen.
18. Rosengrant B. Potentiometers: A Proven Position Sensing Solution that Every Engineer Needs to Consider in Modern Designs / B. Rosengrant, B. Kostik // Sensors Online. – 2011. – Mode of access: URL: <http://www.sensorsmag.com/sensors/position-presence-proximity/potentiometers-a-proven-position-sensing-solution-every-engi-9038>.
19. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение / Г. Виглеб. – М.: Мир, 1989. – 196 с.
20. Датчики: справочное пособие / под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с.
21. Бондер В.А. Измерительные приборы: в 2 т. / В.А. Бондер, А.В. Алферов. – М.: Изд.-во стандартов. – 1986. – Т. 1: Теория измерительных приборов. Измерительные преобразователи. – 1986. – 390 с.
2. Sergiyenko O.Yu., Hernandez-Balbuena D., Gurko A.G. et al. Optimal Kinematic Control of a Robotic Excavator with Laser TVS feedback. *Proc. of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Vienna, Austria, 10 – 14 November, 2013. pp. 4239–4244.
3. Kirichenko I.G., Gurko A.G. Regulyator s vychislyaemym momentom dlya upravleniya rabochim oborudovaniem ekskavatora [Computed torque controller for control of backhoe equipment]. *Budivnistvo. Materialoznavstvo. Mashinobuduvannya: sb. nauch. tr. Seriya «Pidjumno-transportni, budivel'ni i dorozhni mashini i obladnannya*, 2013. pp. 210–220.
4. Wu Z., Sun K.Y., Song M., Zheng M. Design an Autonomous Excavation System for Hydraulic Excavators. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, Vol. 437. pp.471–474.
5. Seward D., Margrave F. LUCIE the robot excavator-design for system safety. *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996, vol. 1. pp. 963–968.
6. Ghassemi F., Tafazoli S., Lawrence P.D., Hashtrudi-Zaad K. An accelerometer-based joint angle sensor for heavy-duty manipulators. *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'02*, 2002, vol. 2. pp. 1771–1776.
7. Peussa P., Chan D., Bachmann S. et al. Using solenoid valves for proportional pilot pressure control in miniexcavators. *Proc. of the 4th Scandinavian International Conference*, 1995, pp. 1139–1151.
8. Corke P., Roberts J., Winstanley G. Sensors and Control for Mining Robotics. *Proc. of the 4th International Symposium on Mine Mechanisation and Automation*. Brisbane, Australia, 6-9 July 1997, B1.11-21.
9. Yang S.Y., Lee M.C., Lee M. H., Arimoto S. Measuring system for development of stroke-sensing cylinder for automatic excavator. *Proc. Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 1998, vol. 45 (3). pp. 376–384.
10. Shao H., Yamamoto H. et al. Automatic excavation planning of hydraulic excavator. *Intelligent Robotics and Applications*, 2008. pp. 1201–1211.
11. Sanjiv S. The state of the art in automation of earthmoving. *Journal of Aerospace Engineering*, 1997, vol. 10 (4). pp. 1–29.

References

1. Jun Gu, Seward D. Improved control of intelligent excavator using proportional-integral-plus gain scheduling. *Journal of Central South University*, 2012, vol. 19 (2). pp. 384–392.

12. Mulligan I.J., Mackworth A.K., Lawrence P.D. A model-based vision system for manipulator position sensing *Proc. of the Workshop on Interpretation of 3D Scenes*, 1989. pp. 186–193.
 13. Kalabin E. Kopat' s umom. Sistemy upravleniya ekskavatorami Topcon 3Dxi [Dig wisely. Excavators control systems Topcon 3Dxi]. *Stroitel'naya tekhnika i tekhnologii*, 2007, vol. 2. pp. 106–112.
 14. Leica PowerDigger 3D. The future of excavating. Available at: <http://www.leicageo-systems.com/downloads123/zz/machine/PowerDigger3D/brochures/PowerDigger3DBROen.pdf> (accessed 12.10.2014).
 15. Shaban E.M., Ako S., Taylor C.J., Seward D.W. Development of an automated verticality alignment system for a vibration. *Automation in Construction*, 2008, vol. 17 (5). pp. 645–655.
 16. Murakami T., Kato M., Ota M. Precision Angle Sensor Unit for Construction Machinery. *SAE Technical Paper*, 1997, № 972782.
 17. Precision Rotary Potentiometer. Available at: <http://www.fernsteuergeraete.de/en/product-range/precision-rotary-potentiometer.html> (accessed 12.10.2014).
 18. Rosengrant B., Kostik B. Potentiometers: A Proven Position Sensing Solution that Every Engineer Needs to Consider in Modern Designs. *Sensors Online*, 2011. Available at: <http://www.sensorsmag.com/sensors/position-presence-proximity/potentiometers-a-proven-position-sensing-solution-every-engi-9038>. (accessed 12.10.2014).
 19. Wiegler G. *Sensortechnik: Übersicht, Applikation, Anwendungen*. München: Franzis, 1986. 198 s. (Russ. ed.: Viegler G. *Datchiki. Ustroistvo i primenenie*. Moscow, Mir Publ., 1989. 196 p.).
 20. *Datchiki: Spravochnoe posobie* [Sensors: Handbook]: Editors V.M. Sharapova, E.S. Polishchuka. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2012. 624 p.
 21. Bonder V.A., Alferov A.V. *Izmeritel'nye pribory*. Vol. 1. *Teoriya izmeritel'nykh priborov. Izmeritel'nye preobrazovateli*, Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1986. 390 p.
- Рецензент: Е.С. Венцель, профессор, д.т.н., ХНАДУ.
- Статья поступила в редакцию 24 ноября 2014 г.
-