

УДК 62-932:62.532

## СТРУКТУРНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РОБОЧИМ ПРОЦЕСОМ ЕКСКАВАТОРА

О.Г. Гурко, доц., к.т.н.,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* На основі аналізу завдань, які повинні вирішуватися системою автоматичного управління робочим процесом гідравлічного екскаватора, запропоновано ієрархічну структуру системи управління. Виконано декомпозицію процесу управління, що дозволило розробити структурну модель, яка відображає особливості багаторівневої територіально-розподіленої системи управління робочим процесом екскаватора.

*Ключові слова:* екскаватор, земляні роботи, автоматизація, структура, планування завдань.

## СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМ ПРОЦЕССОМ ЭКСКАВАТОРА

А.Г. Гурко, доц., к.т.н.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

*Аннотация.* На основе анализа задач, которые должны решаться системой автоматического управления рабочим процессом гидравлического экскаватора, предложена иерархическая структура системы управления. Выполнена декомпозиция процесса управления, что позволило разработать структурную модель, отражающую особенности многоуровневой территориально-распределённой системы управления рабочим процессом экскаватора.

*Ключевые слова:* экскаватор, земляные работы, автоматизация, структура, планирование задач.

## A STRUCTURAL MODEL OF AN EXCAVATOR WORKFLOW CONTROL SYSTEM

A. Gurko, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.),  
Kharkov National Automobile and Highway University

*Abstract.* Earthwork improving is connected with excavators automation. In this paper, on the basis of the analysis of problems that a hydraulic excavator control system have to solve, the hierarchical structure of a control system have been proposed. The decomposition of the control process had been executed that allowed to develop the structural model which reflects the characteristics of a multilevel space-distributed control system of an excavator workflow.

*Key words:* earthwork, automated excavator, intelligent excavation system, structure, task planning.

### Вступ

На сьогодні гідравлічні екскаватори (ГЕ) є найбільш поширеними машинами для земляних робіт. ГЕ використовуються як на великих будівельних майданчиках (наприклад, при будівництві доріг, дамб та ін.), так і в обмежених міських умовах (при спорудженні траншей, котлованів тощо). При цьому вимо-

ги до якості, швидкості та економічності виконання цими машинами робіт постійно підвищуються. До недавнього часу вирішення проблеми підвищення ефективності виконання земляних робіт здійснювалося в основному традиційними методами – за рахунок удосконалення конструкцій вузлів та механізмів ГЕ, у тому числі й за рахунок підвищення їх універсальності шляхом розширення

номенклатури та складності робочого обладнання, збільшення числа його ступенів вільності. Це ускладнює роботу машиніста, вимагає від нього дуже високої кваліфікації. Крім того, ускладнення ГЕ веде до того, що людина вже не в змозі реалізувати всі можливості машини, а неправильні дії машиніста можуть призвести до нештатних режимів роботи і нещасних випадків. У зв'язку з цим виникло протиріччя між стрімким розвитком теорії та практики екскаваторобудування і фізіологічними можливостями людини-машиніста. Подолання цього протиріччя можливе лише за рахунок впровадження системи автоматичного управління робочим процесом гідравлічного екскаватора (САУРПГЕ), що допомагатиме машиністу при проведенні земляних робіт або повністю візьме на себе функції управління ГЕ.

### Аналіз публікацій

Питанню автоматизації робочих процесів машин для земляних робіт і, зокрема, екскаваторів присвячено чимало публікацій. Значна їх кількість спрямована на автоматизацію кар'єрних екскаваторів [1–2]. Наприкінці 70-х – на початку 80-х років ХХ ст. з'являються роботи з автоматизації ГЕ. Так, в 1983 р. захищено дисертацію [3], в якій доведено, що системи управління екскаваторами з електромеханічними приводами не можуть бути застосовані для управління ГЕ, та розроблено систему управління операцією копання для екскаватора EO-4121A. Як елементну базу системи управління використано гідравлічні логічні елементи. Впровадження системи дозволило збільшити продуктивність екскаватора на 14 %, зменшити питому витрату палива на 15 %, а також знизити навантаження на машиніста за рахунок зменшення числа перемикачів механізмів під час копання.

У цьому ж році в США компанією «Southern California Gas Company» було розпочато програму «The Robot Excavator (REX) Development Program», метою якої було створення роботизованої екскаваторної системи для робіт по заміні газотранспортних комунікацій [4]. З того часу основна тенденція розвитку САУРПГЕ пов'язана з їх роботизацією і, відповідно, застосуванням відповідних методів робототехніки з урахуванням особливостей робочого процесу ГЕ [5–12].

Наукові дослідження в області автоматизації робочих процесів екскаваторів привели до серійного виробництва САУРПГЕ. При цьому досить широко застосовуються системи, засновані на використанні GPS/ГЛОНАСС і лазерних технологій. Як правило, ці системи використовують бортові ЕОМ з людино-машинним інтерфейсом, який в реальному часі відображає інформацію про стан машини і конфігурацію робочого обладнання. На основі отриманої інформації машиніст має можливість коригувати свої дії з метою підвищення якості копання [13–15]. Вказані системи продаються окремо та можуть бути встановлені на вже існуючу машину, хоча провідні виробники екскаваторів, такі як Caterpillar, Volvo, Komatsu, вже використовують їх як штатне обладнання. Найбільш відомими марками сучасних систем такого типу є TOPCON, Leica, Trimble, TF – Technologies A/S та ін., що випускають продукцію зі схожими можливостями. Однак переважна більшість наведених систем є індикаторними або напівавтоматичними, основною ланкою в яких залишається машиніст.

Результати вказаних вище та інших робіт зробили суттєвий внесок у вирішення проблеми автоматизації робочого процесу ГЕ. Проте аналіз цих досліджень показує, що активній автоматизації підлягають, в основному, транспортні операції та технологічний контур стеження за заданою траєкторією копання; при цьому розробка САУРПГЕ проводиться без використання системного підходу, а питанням комплексної автоматизації всього екскаватора приділяється недостатньо уваги.

### Мета і постановка завдання

Метою цього дослідження є підвищення ефективності робочого процесу ГЕ за рахунок розробки структурної моделі САУРПГЕ.

Для досягнення вказаної мети необхідно виділити основні окремі завдання САУРПГЕ; зробити вибір та обґрунтування структурної моделі САУРПГЕ.

### Структурний аналіз САУРПГЕ

Розширено управління робочим процесом ГЕ вимагає вирішення трьох завдань: планування земляних робіт, управління переміщенням ГЕ і його маніпулятора та вимірювання зна-

чень параметрів, необхідних для досягнення цілей управління. Відповідно САУРПГЕ повинна здійснювати зазначені функції. Звідси найбільш доцільною є ієрархічна структура САУРПГЕ (рис. 1), де, за аналогією зі структурою АСУ ТП, нижнім рівнем є рівень датчиків, що вимірюють необхідні параметри процесу, і виконавчих механізмів, що впливають на ці параметри. На цьому рівні також здійснюється узгодження сигналів датчиків зі входами управляючих пристроїв, а управляючих сигналів – з виконавчими механізмами, забезпечується зв'язок між підсистемами та надання інформації машиністові.

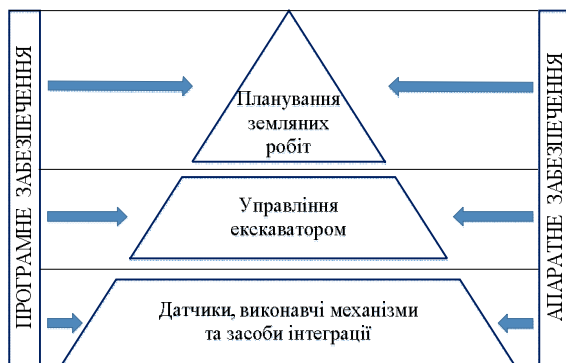


Рис. 1. Ієрархічна структура системи управління екскаваторними роботами

Середній рівень – рівень обчислювальних та управляючих пристроїв, що здійснюють збір та обробку даних, які поступають з датчиків, та формують управляючі впливи на виконавчі механізми.

Верхній рівень – це рівень проектного офісу. На цьому рівні здійснюється планування земляних робіт та контроль їх виконання.

Складність проблеми автоматизації робочого процесу ГЕ приводить до необхідності виконання її декомпозиції, тобто подання кожної із зазначених задач у виді множини взаємопов'язаних підзадач. При цьому потрібно виконати структурний синтез САУРПГЕ, тобто визначити оптимальну або найбільш раціональну її структуру.

Аналіз системних особливостей процесу управління земляними роботами дозволяє дійти висновку про територіально-розподілений характер САУРПГЕ. Розглянемо роботу системи більш детально (рис. 2). На першому рівні – рівні планування земляних робіт – здійснюється розбиття будівельного

майданчика на зони і формування планів та / або нарядів на виконання робіт для кожної зони. Для цього будується 3D модель будівельного майданчика, а у подальшому також виконується вимірювання поточної робочої зони ГЕ, відзначаючи її зміну. Ці роботи проводяться лазерними та супутниковими комплексами. Потім, на підставі отриманої моделі місцевості, а також даних про параметри потрібного земляного спорудження, здійснюється планування робіт ГЕ (або групи ГЕ). План робіт включає визначення найбільш раціональних траєкторій кромки ковша ГЕ при розробці забою. Ці траєкторії ураховують особливості кожної машини і можуть бути розраховані, наприклад, з метою мінімізації витрат енергії на копання [16]. Планування робіт також передбачає знаходження оптимальних місць розташування ГЕ під час виконання робіт. Детальне планування рухів безпосередньо ГЕ є метою не цього, а наступного рівня ієрархії (рис. 2).

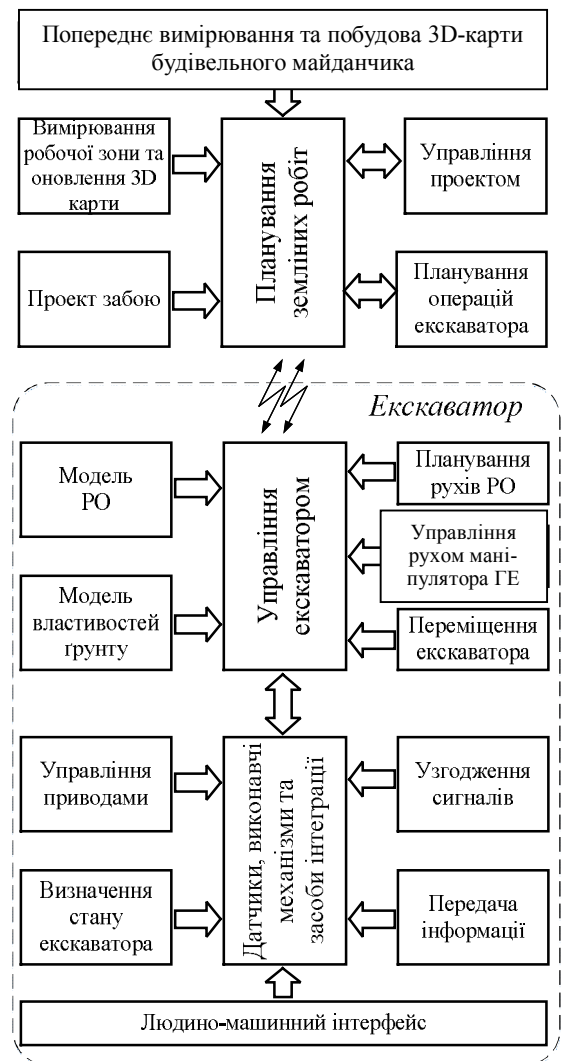


Рис. 2. Структурна модель системи управління екскаватором

Інші важливі завдання, що виконуються на рівні планування земляних робіт, включають планування переміщень екскаватора між ділянками, перевірку якості виконання екскаваторних робіт, а також створення бази даних про хід робіт, що виконуються, силами інформаційної системи управління проектами [17, 18].

Таким чином, основною метою планування завдань є визначення оптимальної послідовності дій ГЕ для досягнення глобальних цілей, таких як мінімізація часу виконання робіт з максимально ефективним використанням парку машин.

Сформований план робіт передається машині по бездротових лініях зв'язку.

Другим рівнем є «Управління екскаватором», на якому забезпечується управління окремим ГЕ. Апаратура цього рівня одержує план робіт, що розроблений на попередньому рівні ієрархії, на підставі якого розраховує закони зміни узагальнених координат маніпулятора ГЕ, що забезпечують проходження кромки ківша за заданими траєкторіями, виробляє управляючі впливи на виконавчі пристрої маніпулятора ГЕ на підставі інформації про поточний стан робочого обладнання та оточуючого середовища, а також з урахуванням прогнозу сил взаємодії ківша з ґрунтом.

Ефективна робота САУРПГЕ не може бути реалізована без системи навігації ГЕ, метою якої є визначення маршруту руху ГЕ від однієї точки робочого майданчика до іншої як у процесі розробки одного забою, так і для переміщення до нового місця копання [19, 20].

Третій рівень ієрархії «Датчики, виконавчі механізми та засоби інтеграції» відповідає за роботу виконавчих елементів та іншого апаратного забезпечення. Розробка електрогідравлических клапанів для електронного управління ланками маніпулятора ГЕ екскаватора є одним з основних напрямів розвитку даного рівня. Крім того, на цьому рівні здійснюється інтеграція й управління кожним із вказаних рівнів системи.

### Висновки

Таким чином, проблема автоматизації робочого процесу ГЕ є край складною й такою,

що важко формалізується. Вона потребує одночасної розробки та використання законів управління гідроприводом маніпулятора ГЕ, більш досконалих приводів для здійснення руху ланок маніпулятора, технічних засобів для визначення координат стану робочого обладнання та навантажень на ньому, синтезу бортової мережі машини, системи мобільного офісу тощо.

У роботі одержано розв'язок задачі структурного синтезу САУРПГЕ, що є необхідним для розробки ефективної повністю автономної системи управління виконанням земляних робіт. Раціональною є ієрархічна структура САУРПГЕ, на нижньому рівні якої розміщені датчики, виконавчі механізми і засоби інтеграції; середній рівень – рівень пристроїв управління екскаватором, а верхній рівень – це рівень планування земляних робіт й контролю за їх виконанням.

Виконано декомпозицію завдань, що вирішуються на кожній з підсистем САУРПГЕ, що дозволяє визначити найменш розроблені структурні елементи системи. Для рівня управління екскаватором ними є підсистеми планування рухів маніпулятора екскаватора та реалізації цих рухів в умовах невизначеності, а також переміщення самого ГЕ від однієї точки місцевості до іншої. Розробка вказаних підсистем є метою подальших досліджень.

### Література

1. Остриров В.Н. Разработка и исследования системы оптимального управления процессом подъема ковша экскаватора-драглайна на выгрузку: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.07 «Автоматизация технологических процессов и производств» / В.Н. Остриров. – М., 1980. – 20 с.
2. Певзнер Л.Д. Алгоритмический и структурный синтез автоматизированного управления шагающим экскаватором-драглайном: автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук: спец. 05.13.07 «Автоматизация технологических процессов и производств» / Л.Д. Певзнер. – М., 1987. – 31 с.
3. Акинфиев А.А. Создание системы управления операцией копания для одноковшового гидравлического экскаватора с целью повышения эффективности его

- работы: дис. канд. техн. наук: 05.05.04 / А.А. Акинфиев. – М., 1983. – 236 с.
4. Haynes J. N. A. Robotics-Shaping the future of pipeline excavation for repair / J. N. Haynes, A. Briggs // Proceeding of 17th World Gas Conference, Washington, DC, USA. – 1988.
  5. Vaha P.K. Excavator dynamics and effect of soil on digging / P.K. Vaha, A.J. Koivo, M.J. Skibiniewski // Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. – 1991. – P. 297–306.
  6. Bradley D. A. Artificial intelligence in the control and operation of construction plant – the autonomous robot excavator / D. A. Bradley, D. W. Seward, J. E. Mann, M. R. Goodwin // Automation in construction. – 1993. – Vol. 2, № 3. – P. 217–228.
  7. Yu H. Review of Modelling and Remote Control for Excavators / H. Yu, Y. Liu, M.S. Hasan // International Journal of Advanced Mechatronic Systems. – 2010. – Vol. 2, № 1. – P. 68–80.
  8. Gu J. Improved control of intelligent excavator using proportional-integral-plus gain scheduling // J. Gu, D. J. Seward // Journal of Central South University. – 2012. – Vol. 19, № 2. – P. 384–392.
  9. Дуданов И.В. Автоматизация исполнительных систем гидравлического экскаватора: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.07 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)» / И.В. Дуданов. – Самара, 2008. – 16 с.
  10. Choi J. Tracking Control of Hydraulic Excavator Using Time Varying Sliding Mode Controller with Fuzzy System / J. Choi // Advanced Science Letters. – 2012. – Vol. 15, № 1. – P. 78–82.
  11. Kim Y. B. Dynamically optimal trajectories for earthmoving excavators / Y.B Kim, J. Ha, H. Kang, et al // Automation in Construction. – 2013. – Vol. 35. – P. 568–578.
  12. Gurko A. Trajectory Tracking Control of an Excavator Arm Using Guaranteed Cost Control / A. Gurko, O. Sergiyenko, J.I. Nieto Hipólito, et al // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 383. – P. 177–196.
  13. Калабин Е. Системы управления для экскаваторов 3Dxi / Е. Калабин – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://prin.ru/articles/135/>.
  14. Trimble GCS600 Grade Control System For Excavators – [Electronic source]. – Access mode: [http://www.sitech-wc.ca/Products\\_and\\_Solutions/Machine\\_Control\\_Systems/Trimble\\_GCS600\\_Excavators.aspx](http://www.sitech-wc.ca/Products_and_Solutions/Machine_Control_Systems/Trimble_GCS600_Excavators.aspx).
  15. Leica iCON excavate iXE3. Advanced 3D Excavator Control System [Electronic source]. – Access mode: [http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-iCON-excavate-iXE3\\_81272.htm](http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-iCON-excavate-iXE3_81272.htm)
  16. Михирев П.А. Основы теории ковшовых автоматизированных рабочих органов / П. А. Михирев. – Новосибирск: Наука, 1986. – 166 с.
  17. Lee S. Development of a heuristics-based task planning system for intelligent excavating system / S. Lee, J. Kim, J. Park, J. Seo, Y. Kim // Proceeding of 26th ISARC, Texas, USA. – 2009. – P. 307–316.
  18. Seo J. Task planner design for an automated excavation system / J. Seo, S. Lee, J. Kim, S. K. Kim // Automation in Construction. – 2011. – Vol. 20, № 7. – P. 954–966.
  19. Kim S.K. Intelligent navigation strategies for an automated earthwork system / S.K. Kim, J. Seo, J. S. Russell // Automation in Construction. – 2012. – Vol. 21. – P. 132–147.
  20. Schmidt D. Construction site navigation for the autonomous excavator Thor / D. Schmidt, K. Berns // Proceeding of 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications. – 2015. – P. 90–97.

## References

1. Ostrirov V.N. *Razrabotka i issledovaniya sistemy optimal'nogo upravleniya protsessom pod'ema kovsha ekskavatora-draglaina na vygruzku*. Avtoref. dis. na soiskanie uch. stepeni kand. tekhn. nauk: spets. 05.13.07 «Avtomatizatsiya tehnologicheskikh protsessov i proizvodstv» [Development and investigation of an optimal control system of dragline-excavator bucket lifting process for unloading]. Moscow, 1980. 20 p.
2. Pevzner L.D. *Algoritmicheskii i strukturnyi sintez avtomatizirovannogo upravleniya shagayushchim ekskavatorom-draglainom*. Avtoref. dis. na soiskanie uch. stepeni d-ra tekhn. nauk: spets. 05.13.07 «Avtomatizatsiya tehnologicheskikh protces-sov i proizvodstv» [Algorithmic and structural synthesis of automated system of walking excavator-dragline]. Moscow, 1987. 31 p.
3. Akinfiev A.A. *Sozdanie sistemy upravleniya operatsiei kopaniya dlya odnokovshovogo*

- gidravlichesкого экскаватора с тsel'yu povysheniya effektivnosti ego raboty*. Dis. kand. tekhn. nauk: 05.05.04 [Design of a digging operation control system for a single-bucket hydraulic excavator with the purpose of improving its performance]. Moscow, 1983. 236 p.
4. Haynes J. N., Briggs A. Robotics-Shaping the future of pipeline excavation for repair. Proceeding of 17th World Gas Conference, Washington, DC, USA. 1988.
  5. Vaha P.K., Koivo A.J., Skibiniewski M.J. Excavator dynamics and effect of soil on digging. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 1991. pp. 297–306.
  6. Bradley D.A., Seward D.W., Mann J.E., Goodwin M.R. Artificial intelligence in the control and operation of construction plant – the autonomous robot excavator. Automation in construction. 1993, Vol. 2, no. 3. pp. 217–228.
  7. Yu H., Liu Y., Hasan M.S. Review of Modeling and Remote Control for Excavators. International Journal of Advanced Mechatronic Systems. 2010. Vol. 2, no. 1. pp. 68–80.
  8. Gu J., Seward D. J. Improved control of intelligent excavator using proportional-integral-plus gain scheduling. Journal of Central South University. 2012. Vol. 19, no. 2. pp. 384–392.
  9. Dudanov I.V. *Avtomatizatsiya ispolnitel'nykh sistem gidravlichesкого экскаватора*. Avtoref. dis. na soiskanie uch. stepeni kand. tekhn. nauk: spets. 05.13.06 «Avtomatizatsiya i upravlenie tehnologichskimi processami i proizvodstvami (promyshlennost)» [Automation of actuating systems of hydraulic excavator]. Samara, 2008. 16 p.
  10. Choi J. Tracking Control of Hydraulic Excavator Using Time Varying Sliding Mode Controller with Fuzzy System. Advanced Science Letters. 2012. Vol. 15, no. 1. pp. 78–82.
  11. Kim Y.B., Ha J., Kang H. Dynamically optimal trajectories for earthmoving excavators. Automation in Construction. 2013. Vol. 35. pp. 568–578.
  12. Gurko A., Sergiyenko O., Nieto J.I. Hipólito. Trajectory Tracking Control of an Excavator Arm Using Guaranteed Cost Control. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2016. Vol. 383. pp. 177–196.
  13. Kalabin E. *Sistemy upravleniya dlya ekskavatorov Topcon 3Dxi* [Control systems for excavators Topcon 3Dxi]. Available at: <http://prin.ru/articles/135/>.
  14. Trimble GCS600 Grade Control System For Excavators. Available at: [http://www.sitech-wc.ca/Products\\_and\\_Solutions/Machine\\_Control\\_Systems/Trimble\\_GCS600\\_Excavators.aspx](http://www.sitech-wc.ca/Products_and_Solutions/Machine_Control_Systems/Trimble_GCS600_Excavators.aspx).
  15. Leica iCON excavate iXE3. Advanced 3D Excavator Control System. Available at: [http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-iCON-excavate-iXE3\\_81272.htm](http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-iCON-excavate-iXE3_81272.htm).
  16. Mikhirev P.A. *Osnovy teorii kovshovykh avtomatizirovannykh rabochikh organov* [Basic theory of automated bucket working tools]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 166 p.
  17. Lee S., Kim J., Park J., Seo J., Y. Kim. Development of a heuristics-based task planning system for intelligent excavating system. Proceeding of 26th ISARC, Texas, USA. 2009. pp. 307–316.
  18. Seo J., Lee S., Kim J., Kim S. K. Task planner design for an automated excavation system. Automation in Construction. 2011. Vol. 20, no. 7. pp. 954–966.
  19. Kim S.K., Seo J., Russell J.S. Intelligent navigation strategies for an automated earthwork system. Automation in Construction. 2012. Vol. 21. pp. 132–147.
  20. Schmidt D., Berns K. Construction site navigation for the autonomous excavator Thor. Proceeding of 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications. 2015. pp. 90–97.
- Рецензент: С.С. Венцель, профессор, д.т.н., ХНАДУ.