

Нейросетевая система управления процессом уплотнения дорожных материалов асфальтоукладчиками

А.П. Прокопьев, Ж.И. Набижанов

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Аннотация: Рассматривается задача создания нейросетевой системы автоматического управления (САУ) процессом уплотнения для асфальтоукладчиков (АУ). Данная задача направлена на повышение производительности АУ и качества дорожных покрытий автомобильных дорог. Реализована модель инверсного нейроуправления. При обучении искусственной нейронной сети (ИНС) использовалась ошибка выхода объекта управления. Входные информационные сигналы нейросетевой САУ: скорость движения укладчика; тип асфальтобетонной смеси; толщина слоя; усилие в толкателе трамбующего бруса; ускорение вибрационной плиты. Представлены результаты вычислительного эксперимента в программе MATLAB/Simulink, которые показали хорошую сходимость с экспериментальными данными полевых испытаний асфальтоукладчиков.

Ключевые слова: автоматическое управление уплотнением, неразрушающие технологии, искусственные нейронные сети, дорожное строительство, асфальтоукладчики.

Важным этапом строительства автомобильных дорог является процесс уплотнения дорожных покрытий комплектом машин – асфальтоукладчик и звено дорожных катков. За счет применения современных АУ, при оптимальной настройке режимных параметров рабочих органов, можно получить коэффициент уплотнения смеси, равный 0,96 и больше. Оптимальная настройка режимов работы укладчика возможна только с учетом текущей информации о коэффициенте уплотнения. В современных асфальтоукладчиках режимы уплотнения изменяются машинистом в ручном режиме. Асфальтоукладчик – сложная линейная дорожно-строительная машина, которая во время работы выполняет несколько технологических процессов. Необходимо сократить влияние человеческого фактора управлением АУ для повышения производительности и качества уплотнения.

Задача создания САУ процессом уплотнения асфальтобетонной смеси (АБС) рабочим органом АУ решается на базе основополагающего утверждения, что большое влияние на степень уплотнения дорожного

покрытия оказывает трамбуемый брус [1, 2], а число воздействий вибрационной плиты от установленного на ней вибратора практически не оказывает влияния на увеличение плотности АБС, но способствует улучшению качества поверхности уплотненного покрытия [3-5].

Повышение уровня автоматизации комплекта дорожно-строительных машин асфальтоукладчик – дорожные катки позволяет перейти к применению в практике строительства дорожных покрытий технологий Четвертой промышленной революции (ВІМ, Big Data, ІоТ и другие) [6]. Результатом реализации в дорожном строительстве этих технологий является широкое применение киберфизических систем [7, 8].

Рассматривается линейная одноконтурная конечномерная стационарная САУ, функциональная схема которой показана на рис. 1. Здесь u и y – регулируемый вход и регулируемый выход объекта соответственно; g – задающее воздействие (уставка); e – ошибка регулирования: $e = g - y$; f – внешние возмущения, приложенные к входу объекта; ОУ – объект управления; Р – регулятор; Д – датчик.

Приняты следующие условия:

- регулируемая величина – коэффициент уплотнения;
- регулирующее воздействие – частота колебаний трамбуемого бруса;
- толщина уплотняемого слоя находится в диапазоне 0,04 - 0,08 м.

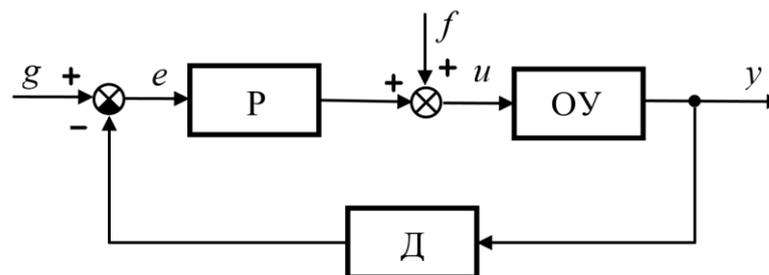


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического управления

Базируясь на основополагающем утверждении, предложена функциональная зависимость нейросетевой САУ уплотнением для асфальтоукладчиков:

$$f_t = \varphi(\text{Type}, V, h, e),$$

где f_t – частота колебаний трамбующего бруса, Гц; Type – показатель типа смеси; V – скорость движения асфальтоукладчика, м/мин; h – толщина слоя покрытия, м; e – ошибка регулирования.

Предложена функциональная схема нейросетевой САУ, рис. 2. Здесь y – коэффициент уплотнения смеси полученный после укладчика; g – заданное (желаемое) значение коэффициента уплотнения смеси; y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 – переменные на входе нейросетевой системы автоматического контроля уплотнения, показатель типа смеси, скорость АУ: усилие в толкателе трамбующего бруса, частота трамбующего бруса, толщина слоя, соответственно; v_1, v_2, v_3 – переменные на входе нейросетевого регулятора, показатель типа смеси, скорость движения АУ, толщина слоя, соответственно. Учитываются особенности рабочего процесса при уплотнении АБ смеси, изменение свойств различных типов смеси при уплотнении, отсутствие приборов, обеспечивающих прогнозирование коэффициента уплотнения по параметрам рабочего процесса.

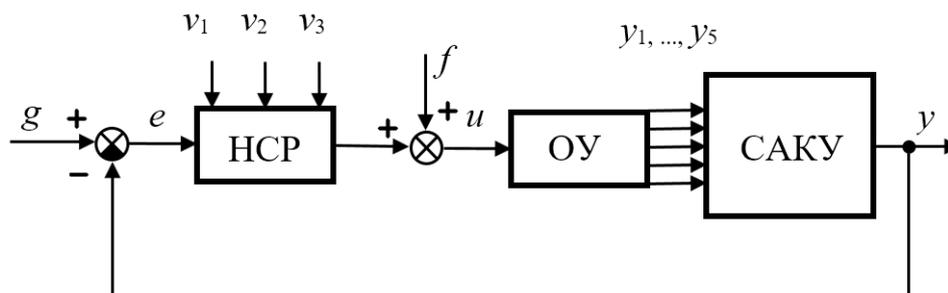


Рис. 2. Функциональная схема нейросетевой системы управления

Объект управления (ОУ) – процесс взаимодействия рабочего органа асфальтоукладчика (трамбующий брус – вибрационная плита) и

асфальтобетонной смеси. Полагаем, что объект управления является линейной стационарной динамической системой, описываемой в переменных состояния уравнениями вида:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}; \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx},\end{aligned}$$

где $u \in \mathbf{R}^r$ – управляющий вход; $x \in \mathbf{R}^n$ – состояние; $y = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m) \in \mathbf{R}^m$ – управляемый выход; $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times r}$, $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{m \times n}$ – числовые матрицы, причем $1 < m \leq r$. Математическая модель объекта управления в пространстве состояний разработана и подробно исследована в работе [9].

$$W(s) = \frac{0,0125 \cdot s^3 + 0,08642 \cdot s^2 + 425,1 \cdot s}{s^4 + 29,41 \cdot s^3 + 1,716 \cdot 10^5 \cdot s^2 + 1,164 \cdot 10^6 \cdot s + 2,99 \cdot 10^9}.$$

Полученные ПФ соответствуют строго правильному виду, так как степень числителя меньше степени знаменателя.

Синтез нейрорегулятора ПИД-типа. Рассмотрена задача синтеза нейроконтроллера для линейного динамического объекта четвертого порядка. Принят следующий алгоритм решения задачи: 1-й этап – формирование обратной модели объекта управления; 2-й этап – формируется выборка для обучения нейроконтроллера; 3-й этап – синтезируется нейроконтроллер методом обратного распространения ошибки.

Наибольшее распространение в САУ получили ПИД регуляторы. Параметрический синтез таких регуляторов для управления объектами не выше второго порядка хорошо изучен. Но, для систем с объектами высокого порядка (выше второго), задача синтеза регуляторов является актуальной.

Одним из подходов к проектированию регуляторов для систем высокого порядка является построение инверсной модели регулятора, использование ИНС прямого распространения и метода Левенберга-Марквардта (Л-М) [9, 10], т.е. метода инверсного нейросетевого управления.

В исследовании принята схема специализированного инверсного

нейроуправления, в которой для обучения ИНС используется ошибка выхода системы, а входным сигналом может быть случайное возмущение, рис. 3.

На рис. 3 приняты обозначения: Δ – набор элементов задержки, количество которых должно быть не меньше, чем порядок объекта; ΔW – изменение вектора весов ИНС; $u_m(k)$ – выход инверсной модели; $e_y(k)$ – ошибка выхода системы; Y – выходы объекта управления:

$$Y = \{y(k), y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n)\}.$$

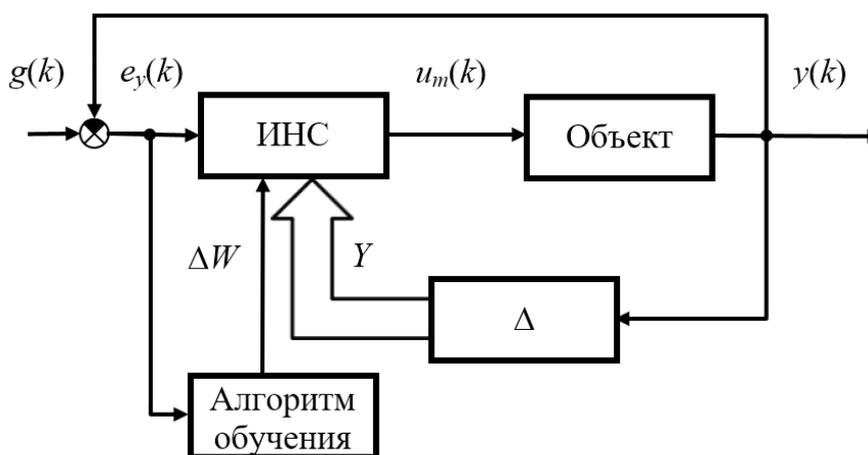


Рис. 3. Схема обучения инверсной модели НС по ошибке выхода

При моделировании в программной среде MATLAB/Simulink полагаем, что известен порядок модели объекта управления. Объект управления описывается передаточной функцией четвертого порядка [11]. Нейросетевой регулятор ПИД-типа получает три входных переменных – ошибку управления, ее производную и интеграл. При дискретной реализации рассматривается ошибка e_k и ее задержанные значения: e_{k-1} ; e_{k-2} ; e_{k-3} ; e_{k-4} .

Первый шаг синтеза – получение обратной модели - описывает схема инверсной нейросетевой модели системы управления на рис. 4, где массивы P и T служат для обучения ИНС методом Л-М. Массивы simout и simout1

накапливают обучающие данные модели. Применена трехслойная ИНС прямого распространения с пятью входами и одним выходом.

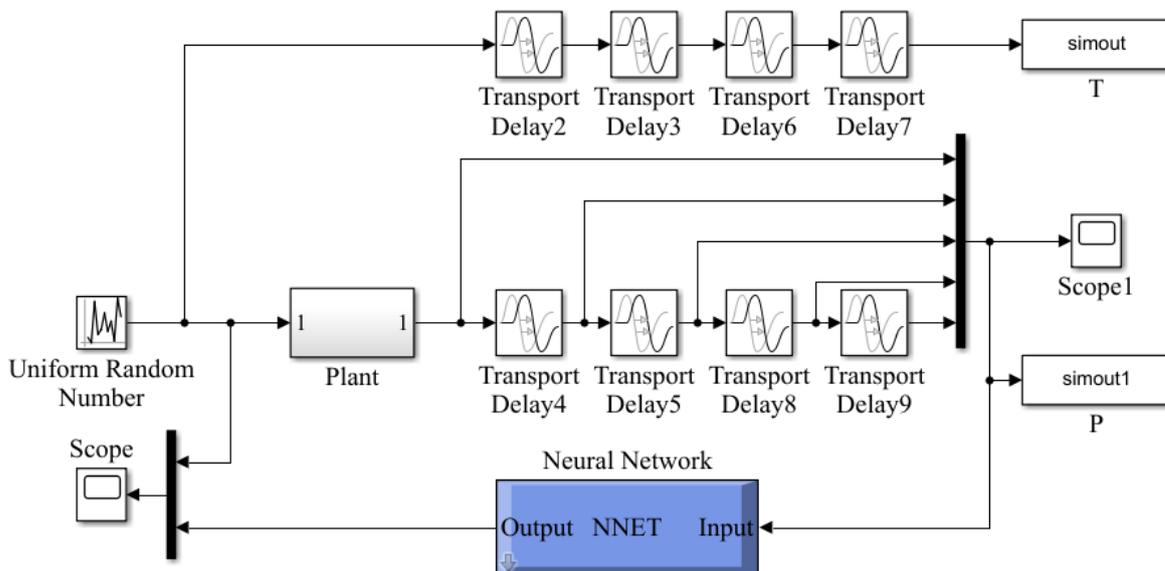


Рис. 4. Инверсная нейросетевая модель системы управления

На рис. 5 показано формирование обучающей выборки с помощью инверсной модели, включенной на выходе желаемой замкнутой системы. Массив P здесь описывает вход дискретного регулятора ПИД-типа, а массив T – выход регулятора, т. е. заданный выход ИНС.

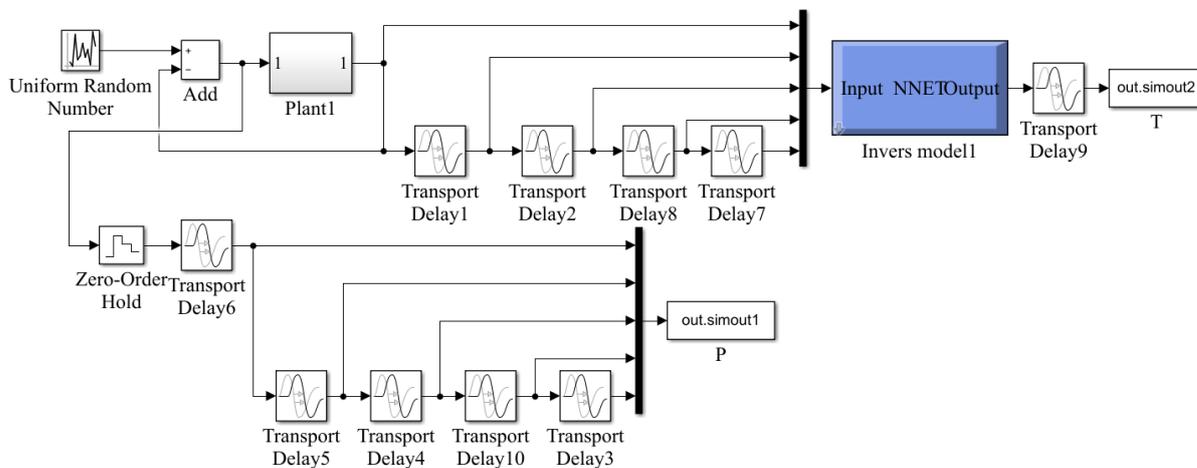


Рис. 5. Модель формирования обучающей выборки для нейроконтроллера

После обработки и масштабирования обучающей выборки, выбрана архитектура ИНС, функцией активации которой между входным и скрытым слоем является тангенциальная, а на выходе линейная функция активации. В программной среде MATLAB/Simulink ИНС обучена методом Л-М. После обучения нейроконтроллер ПИД-типа включается на входе объекта управления (рис. 6).

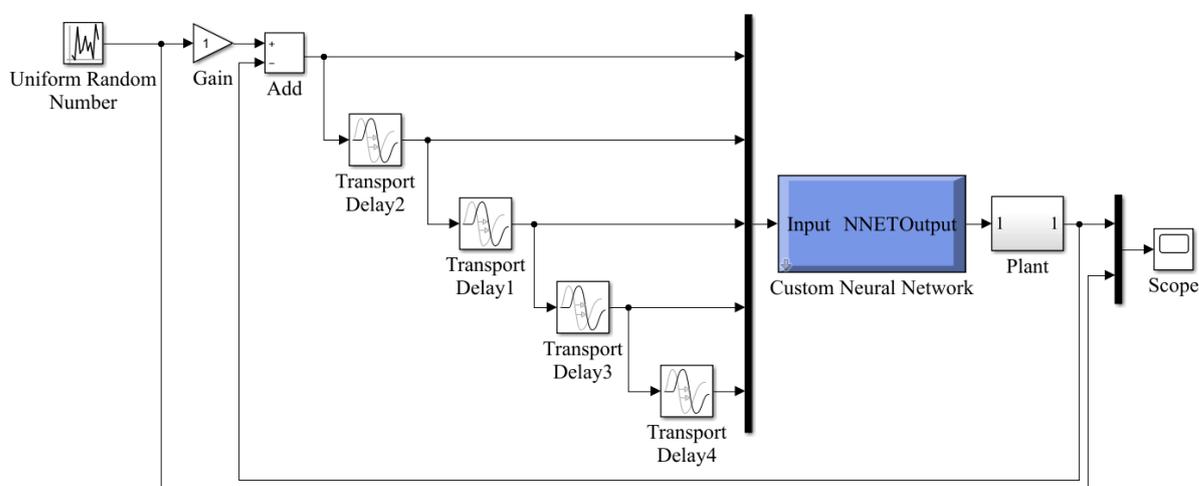


Рис. 6. Модель системы управления с нейроконтроллером ПИД-типа

Имитационный эксперимент. Выполнено имитационное моделирование нейросетевой системы управления процессом уплотнения дорожных материалов с объектом четвертого порядка в программной среде MATLAB/Simulink. Используются исходные данные асфальтобетонной смеси типа А, рабочего органа асфальтоукладчика с трамбуемым брусом и вибрационной плитой. Скорость движения асфальтоукладчика - 3 м/мин. Заданное значение коэффициента уплотнения изменялось ступенчато – 0,94, 0,96, 0,98, 0,95. В соответствии с полученным графиком переходного процесса (рис. 7), показатели качества системы – время переходного

процесса, перерегулирование удовлетворяют требованиям на проектирование нейросетевой САУ.

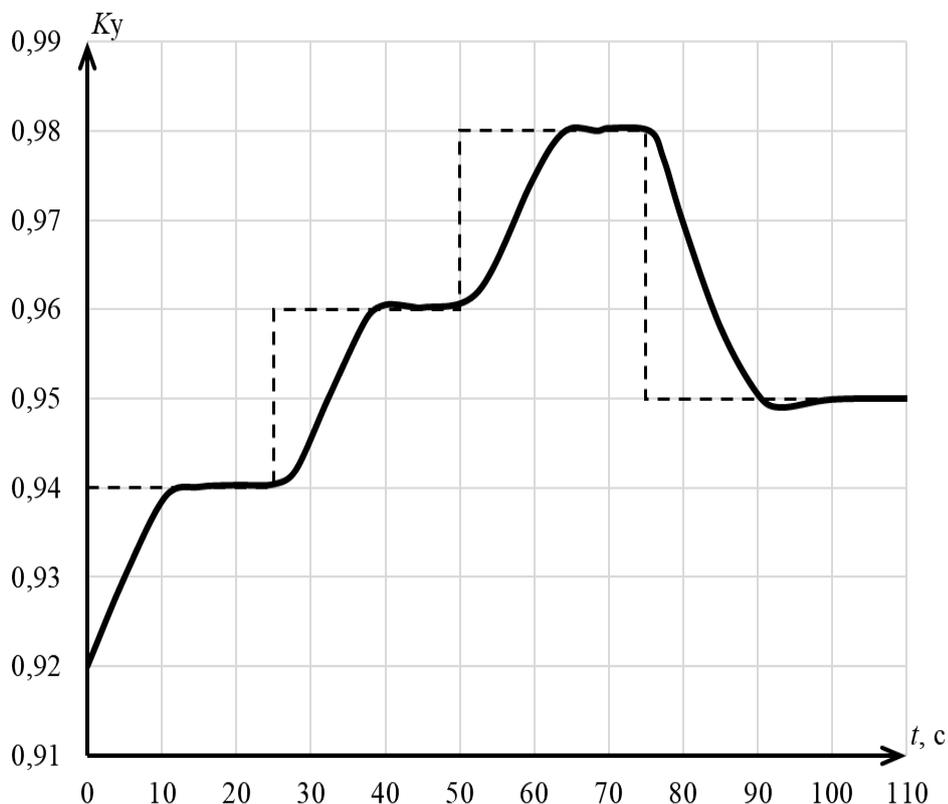


Рис. 7. Переходные процессы в системе с нейро-ПИД регулятором

Выводы. В статье предложена модель нейросетевой системы управления процессом уплотнения для АУ, которая предназначена для повышения эффективности АУ за счет регулирования коэффициента уплотнения АБС изменением частоты колебаний трамбуемого бруса. Предложенный способ автоматического управления процессом уплотнения дорожных материалов АУ может быть использован для вибрационных грунтовых и асфальтовых катков. Обоснованность результатов исследования подтверждается необходимым объемом теоретических и экспериментальных исследований АУ в стендовых и полевых условиях.

Благодарности

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных



исследований (РФФИ грант № 19-37-90052).

Литература

1. Вощинин Н. П. Влияние рабочих параметров трамбующей плиты и режима её работы на эффект уплотнения грунтов // Труды МАДИ. М.: Дориздат, 1953. Вып. 15. С. 108-137.

2. Вощинин Н. П., Горелышев Н. В., Чернигов В. А., Смоленцева В. А. Режим уплотнения асфальтобетонных слоев повышенной толщины // Автомобильные дороги. 1975. № 12. С. 21-22.

3. Кизряков А. Н., Кабанов В. В., Фруктов П. А. Определение параметров виброуплотняющих органов асфальтоукладчиков // Труды ВНИИСтройдормаш. Вып. 107. 1986. С. 63-68.

4. Марышев Б. С., Слепая Б. М., Питецкий Ю. Н., Скрыльник А. П., Островский Э. Б., Либерман М. А., Ксоврели П. И. Уплотнение асфальтобетонных смесей асфальтоукладчиками // Автомобильные дороги. 1979. № 11. С. 11-12.

5. Кизряков А. Н., Кабанов В. В., Фруктов П. А. Исследование уплотняющих рабочих органов асфальтоукладчиков // Труды ВНИИСтройдормаш. 1985. Вып. 102. С. 3-7.

6. Романенко И. И. Автоматизация дорожно-строительных работ при применении информационных систем и 3D моделей // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7214.

7. Насонов Е. И., Макиша Е. В. Киберфизические системы в строительной отрасли // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5678.

8. Чельшков П. Д. Киберфизическая интеграция строительных систем // Естественные и технические науки. 2018. № 6. С. 198-200.

9. Levenberg K. A method for the solution of certain problems in least squares // Quart. Appl. Math. Vol. 2. 1944. pp. 164-168. DOI: 10.1090/QAM/10666.



10. Marquardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // SIAM J. Appl. Math. Vol. 11. 1963. pp. 431-441. DOI: 10.1137/0111030.

11. Prokopev A. P., Nabizhanov Zh. I., Ivanchura V. I., Emelyanov R. T. Modeling the non-destructive control of road surfaces compaction // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. 1399:044094.

References

1. Voshhinin N. P. Trudy MADI. M.: Dorizdat, 1953. 15. pp. 108-137.

2. Voshhinin N. P. Avtomobil'nye dorogi. 1975. № 12. pp. 21-22.

3. Kizrjakov A. N., Kabanov V. V., Fruktov P. A. Trudy VNIISTrojdomash. 107. 1986. pp. 63-68.

4. Maryshev B. S., Slepaja B. M., Piteckij Ju. N., Skryl'nik A. P., Ostrovskij Je. B., Liberman M. A., Ksovreli P. I. Avtomobil'nye dorogi. 1979. № 11. pp. 11-12.

5. Kizrjakov A. N., Kabanov V. V., Fruktov P. A. Trudy VNIISTrojdomash. 1985. 102. pp. 3-7.

6. Romanenko I. I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7214.

7. Nasonov E. I., Makisha E. V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5678.

8. Chelyshkov P. D. Estestvennye i tehicheskie nauki. 2018. № 6. pp. 198-200.

9. Levenberg K. Quart. Appl. Math. Vol. 2. 1944. pp. 164-168. DOI: 10.1090/QAM/10666.

10. Marquardt D. SIAM J. Appl. Math. Vol. 11. 1963. pp. 431-441. DOI: 10.1137/0111030.

11. Prokopev A. P., Nabizhanov Zh. I., Ivanchura V. I., Emelyanov R. T. J. Phys.: Conf. Ser. 2019. 1399:044094.