

УДК 621.311

DOI: 10.26102/2310-6018/2019.25.2.019

В.В. Сальников, Ю.В. Французова  
**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ  
МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКОВ**

*Тульский государственный университет  
Тула, Россия*

*В работе рассмотрен подход к энергетическому анализу управляющих программ (УП) для многоцелевых станков (МЦС) с системой числового программного управления (ЧПУ), целью которого является оценка эффективности потребления энергетических ресурсов при её выполнении на определенном оборудовании. Описан общий подход к программированию систем ЧПУ с помощью языка ISO7Bit. Представлено описание грамматики языка ISO7Bit с помощью метасимволов для построения на ее основе синтаксического и лексического анализаторов текста управляющей программы. Рассмотрено разработанное авторами программное обеспечение, позволяющее производить анализ управляющих программ с целью получения из текста УП контура обрабатываемой поверхности, скоростей резания и подачи в каждой точке траектории, и расчет по полученным данным мощности резания и построение диаграмм потребления энергии приводами станочной системы. Для демонстрации возможностей разработанного программного обеспечения произведен анализ управляющей программы, полученной на предприятии Тульской области. В результате предложен ряд мероприятий для повышения энергетической эффективности ее выполнения: сокращение «нерациональных» холостых ходов инструмента, и оптимизация значения подачи в момент обработки «впадины». Показаны направления по дальнейшей модернизации разработанного программного обеспечения.*

**Ключевые слова:** эффективность, эффективность потребления энергии, эффективность энергопотребления управляющей программы, ISO7Bit.

### **Введение**

Энергоёмкость ВВП России в 2-2,5 раза выше, чем в среднем по миру. В 2008 году Указом Президента РФ [1] была определена цель – снизить к 2020 году энергоёмкость ВВП на 40% от уровня 2007 г. Для достижения указанных целей была принята государственная программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности» [2], входящая как подпрограмма в госпрограмму «Энергоэффективность и развитие энергетики» [3]. Энергоёмкость ВВП Российской Федерации является одним из основных целевых показателей этой программы. Одной из задач программы является снижение значения этого индикатора на 13,5% от уровня 2007 за счет реализации мероприятий программы, что в

совокупности с другими факторами позволит обеспечить достижение цели, поставленной Президентом РФ [1].

По состоянию на 2018 год [4] удалось достичь снижения энергоемкость ВВП от уровня 2007 года на 8,3%, при этом по отчетам Министерства энергетики Российской Федерации этот показатель в 2017 г. [5] составлял также 8,3%. Это говорит о медленных темпах и существенных трудностях в реализации программ снижения энергоемкости ВВП.

Промышленное производство по данным энергетических балансов является наиболее энергоемким, так как потребляет более половины общего объема энергоресурсов [6]. Удельные затраты энергии в себестоимости продукции, выпускаемой российскими предприятиями, в 1,5-2 раза выше, чем в развитых странах [7]. Тенденция на постоянный рост ресурсоемкости неразрывно связана с ростом энерговооруженности и информационной насыщенности производства [8].

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что отечественные производства недостаточно эффективно расходуют энергоресурсы, что значительно снижает конкурентоспособность их товаров на мировом и внутреннем рынках [9]. Следовательно, повышение энергетической эффективности промышленных производств имеет исключительно важное значение.

### **Метод оценки энергетической эффективности**

Планирование, оценка и анализ энергетической эффективности являются необходимыми процессами для принятия обоснованных решений, направленных на ее повышение [10, 11, 12]. Недостаточно измерять только приведенные затраты энергетических ресурсов, которые можно минимизировать за счет сокращения потребления энергии, необходимо знать, возможно ли организовать работу предприятия для выпуска партий товаров большего объема и лучшего качества при относительно меньшем расходовании энергетических ресурсов [10].

Производственные системы (ПС) машиностроительного профиля имеют сложную иерархическую структуру. Нижний ее уровень может быть определен как воздействие на объект обработки (заготовку). Верхний уровень определяется производственным подразделением [14]. Для планирования, оценки и анализа эффективности потребления энергии на каждом уровне иерархии ПС все элементы материального потока, циркулирующего в ней, должны быть однозначно идентифицированы [13].

Ранее в статьях [14, 15, 16] было предложено:

–оборудование рассматривать как некую систему, которая преобразует входной поток заготовок в выходной поток готовых деталей с использованием энергии;

– операции механической обработки рассматривать как преобразование поверхности заготовки в требуемую поверхность детали и оценивать эффективность энергопотребления с позиций качества преобразования, при этом мощность обработки может быть выражена в соответствии с моделью

$$W = \sum_{i=1}^p \int W_{mex}(t, b, S_i, V) dt \quad (1),$$

где  $p$  – количество исполнительных органов станка, задействованных в выполнении обработки;  $W_{mex}$  – затраты энергии при механической обработке сложных поверхностей;  $t$  – время обработки;  $b$  – снимаемый припуск;  $S_i$  – подача в момент обработки  $i$ -ой поверхности заготовки;  $V$  – скорость резания.

– оценку энергоэффективности производить на стадии подготовки производства продукции путем анализа доступной на данном этапе информации (маршрут обработки заготовки, режимы обработки и т.д.).

### **Энергетический анализ управляющих программ**

Энергетический анализ управляющих программ (УП) подразумевает извлечение из текста УП необходимых данных и оценку эффективности энергопотребления ее выполнения на определенном оборудовании. Для этого необходимо разработать средства синтаксического и лексического анализа текста УП.

Обработка на станке, оснащённого системой числового программного управления (ЧПУ), осуществляется по загруженной в его память УП. Основным языком программирования для написания таких программ является G-код, который регламентируется стандартом ISO 6983-1:2009 [17]. В технической литературе СССР этот язык назывался кодом ИСО7-бит (ISO 7-bit). Несмотря на общий стандарт, этот язык имеет множество реализаций, вводимых разработчиками аппаратных устройств (станков). Тем не менее, это не мешает ему оставаться главным языком программирования в отрасли промышленного производства.

Программа написанная с использованием G-кода состоит из кадров, каждый кадр содержит набор команд управления. Команда управления имеет буквенный адрес и определенную числовую информацию. Они могут

следовать в кадре программы в любом порядке. Обычно, в целях удобства, кадр программы формируют в соответствии со следующей последовательностью: подготовительные команды, команды управлением перемещением, команды выбора режимов обработки материала и технологические команды.

Для реализации ПО энергетического анализа на основе лексического и синтаксического анализаторов необходимо описать грамматику языка *ISO 7-bit*. Для этого воспользуемся описанием грамматики языка с помощью метасимволов:

*<начало программы>* → ‘%’  
*<конец программы>* → ‘%’  
*<кадр>* → {<функция>} {<параметр>} <конец кадра>  
*<конец кадра>* → #13#10  
*<функция>* → <идентификатор функции> <цифра> {<цифра>}  
*<идентификатор функции>* → (D | E | F | G | M | S | T)  
*<параметр>* → <идентификатор параметра> [(+|-)] [*<разделитель>*] <цифра> {<цифра>} [*<разделитель>*] [{<цифра>}]  
*<идентификатор параметра>* → (A | B | C | H | I | J | K | L | N | O | P | Q | R | U | V | W | X | Y | Z)  
*<разделитель>* → .  
*<цифра>* → ( 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 )

Синтаксический анализатор реализован с помощью метода рекурсивного спуска: для каждого нетерминального символа создана процедура его обработки, получающая на вход список лексем и текущее положение курсора в нём. Проверка корректности количества аргументов и их типов в каждой из этих процедур выполнена в виде конечного автомата.

### Результаты и обсуждения

Разработанное ПО для энергетического анализа управляющих программ позволяет производить анализ управляющих программ с целью получение из текста УП контура обрабатываемой поверхности, скоростей резания и подачи, расчет по полученным данным мощности резания и построение диаграмм потребления энергии приводов станочной системы.

Алгоритм работы разработанной программы приведен на Рисунке 1.

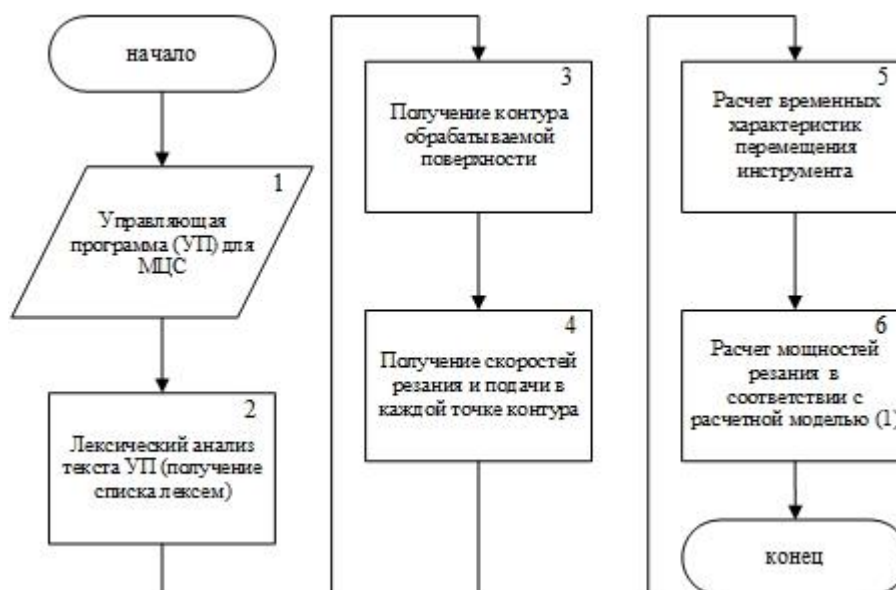


Рисунок 1 –Алгоритм работы программы

На Рисунке 2 приведен интерфейс разработанного программного обеспечения. Анализ начинается с выбора файла управляющей программы. После чего происходит отображение текста УП с подсветкой синтаксиса языка, списка команд, содержащегося в каждом кадре управляющей программы, геометрической информации в виде Таблицы или 3D, энергетических характеристик выполнения программы.

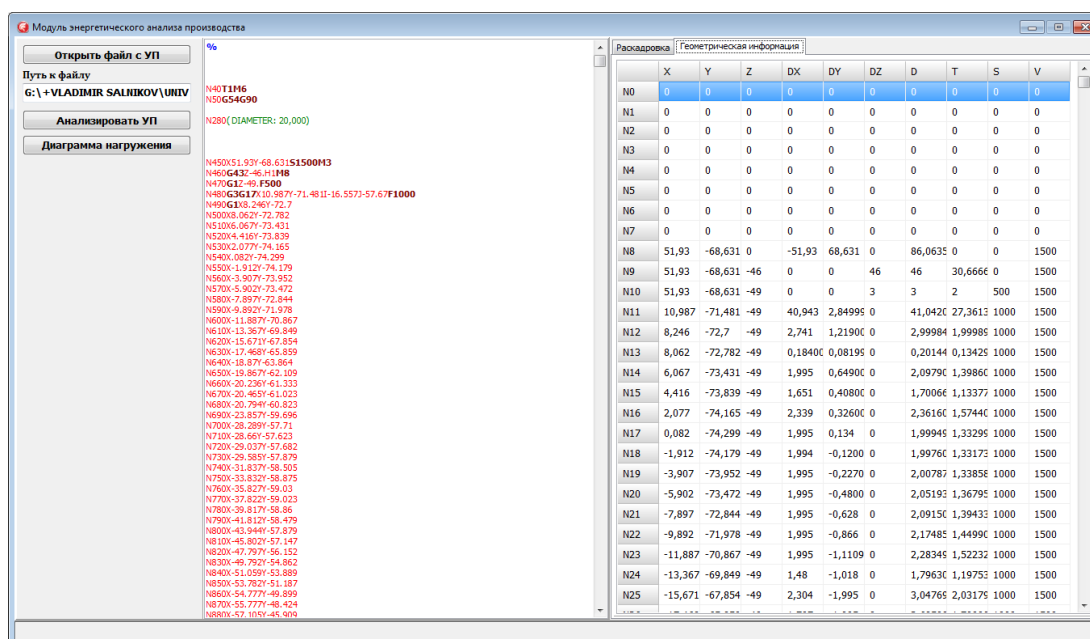


Рисунок 2 - Интерфейс разработанного программного обеспечения.  
 Отображение контура обработки в Табличном виде

Анализируя 3D визуализацию контура обработки, полученную с помощью разработанного ПО, и геометрию обрабатываемой заготовки можно сделать вывод о наличии в ней «нерациональных» холостых ходов инструмента (Рисунок 3). Можно сделать вывод, что они значительно повышают энергоёмкость выполнения операции, так как большое количество энергии тратится на поддержание шпиндельной головки. В этом легко убедиться, наблюдая оперативную диаграмму нагружения на привод оси Z в момент обработки. Нагрузка может достигать 60% от номинального значения.

На Рисунке 4 представлена диаграмма нагружения станочной системы (плановое потребление энергии) во время выполнения управляющей программы. Сравнение планового и фактического потребления энергии, полученного с помощью системы ЧПУ в режиме диагностики, показало, что фактическое потребление имеет постоянную составляющую 4,5 кВт, на 10% большую чем расчетная кривая. Это может быть объяснено, например, влиянием мощности холостого хода двигателей станка, участвующих в процессе формообразования, или влиянием трения в направляющих и т.п.

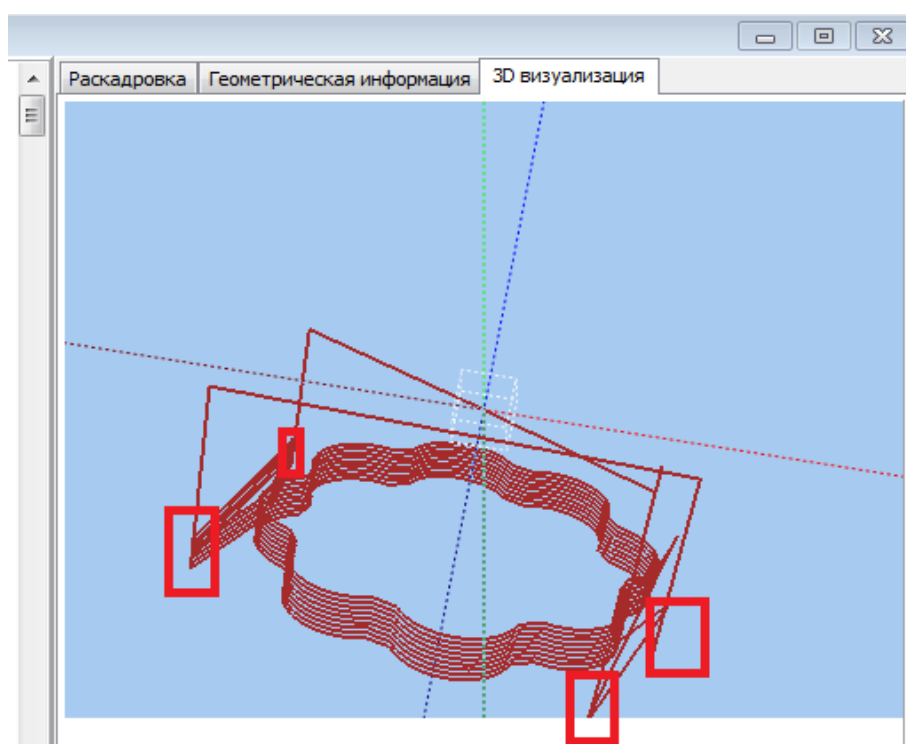


Рисунок 3 – Визуализация контура обработки и наличие «нерациональных» холостых ходов инструмента

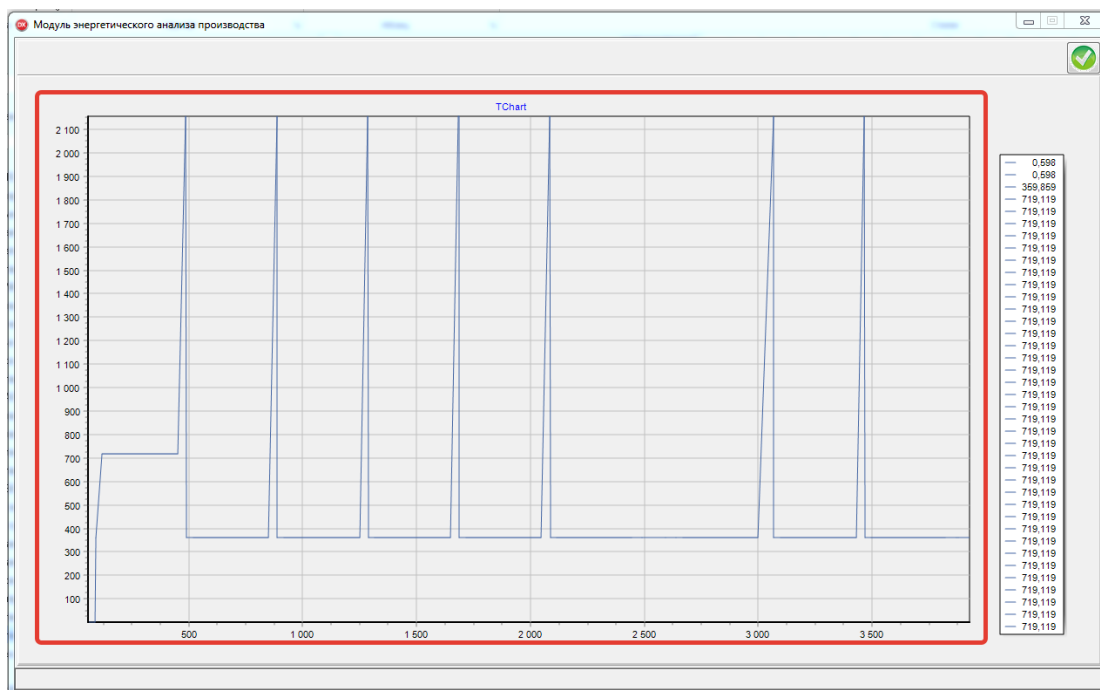


Рисунок 4 – Диаграмма нагружения станочной системы при выполнении управляющей программы

Плоская вершина кривой при обработке выступов говорит о снижении потребляемой мощности в следствии приближения практически к нулевому значению контурной подачи инструмента.

### Заключение

Выявленные связи отклонения фактического энергопотребления от расчетного значения, позволяют сформулировать ряд рекомендации с целью улучшения разработанного программного обеспечения: в расчётную модель (1) целесообразно завести зависимость потребляемой мощности от КПД; производить оценку энергопотребления по каждому приводу станка, а не станочной системы в целом; ввести ввод параметров инструмента, которым осуществляется обработка; организовать оценку эффективности энергопотребления при организации перемещений.

С целью повышения эффективности энергопотребления при обработке впадины целесообразно уменьшать контурную подачу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики: Указ Президента Российской Федерации № 889 от 04 июня 2008 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2008. №23. ст.2672.
2. Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года»: утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. № 2446-р // Собрание законодательства Российской Федерации. 2011. №4. ст.622.
3. Государственная программа Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики»: утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 апреля 2013 г. № 512-р // Собрание законодательства Российской Федерации. 2013. №14. ст.1739
4. Отчет о ходе реализации государственной программы «Энергоэффективность и развитие энергетики» // Министерство энергетики Российской Федерации [Электронный ресурс]. 2017. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/system/download/323/85150> (Дата обращения: 18.06.2019)
5. Отчет о ходе реализации государственной программы «Энергоэффективность и развитие энергетики» // Министерство энергетики Российской Федерации [Электронный ресурс]. 2018. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/system/download/323/96991> (Дата обращения : 18.06.2019)
6. Промышленность России. 2012: Стат.сб. / Росстат. - М., 2012.
7. Иванов В.А. Анализ энергозатрат в различных отраслях промышленности // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/144TVN115.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/144TVN115
8. Сальников В.С. Технологические основы эффективного энергопотребления производственных систем. – Тула: Издательство “Тульский полиграфист”, 2003. – 187 с.
9. Сальников В.В., Французова Ю.В. Энергетическое представление некоторых объектов промышленных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 10. – Тула: ТулГУ, 2018. С. 108 – 113.



10. Ерзин О.А., Сальников В.В. Один из аспектов оценки эффективности технологических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 11 часть 2. – Тула: ТулГУ, 2014. С. 594 – 603.
11. Управление эффективностью и качеством: Модульная программа: Пер. с англ. /Под ред. И. Прокопенко, К. Норта: В 2ч.–Ч.І. –М.: Дело, 2001. –800с.
12. Федоров А. А., Ристхейн Э. М. Электроснабжение промышленных предприятий. –М.: Энергия, 1981. –360с.
13. Ивутин А.Н., Сальников В.В. Роль технологической информации в обеспечении эффективного энергопотребления предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 8: в 2 ч. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. –с. 165 – 170
14. Сальников В.В., Ивутин А.Н., Французова Ю.В. Компьютерная поддержка использования энергетических ресурсов в производственной системе // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, Вып. 6. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – с. 106 – 114
15. Сальников В.В. Математическая модель энергопотребления промышленного оборудования // Интеллектуальные и информационные системы: Материалы Международной научно-технической конференции / Тульский государственный университет. – Тула, 2017. – с. 221 – 224
16. Savnikov V.V.  
Computerbasedsupportforefficientuseofenergyinmanufacturing // Proc. 7th MediterraneanConferenceonEmbeddedComputing (MECO) 2018, pp. 565-568.
17. ISO 6983-1:2009 (Part 1) Automation system and integration. Numerical control of machines. Program format and definition of address words: Data format for positioning, line motion and contouring control systems // ISO, Geneva
18. Устройства числового программного управления для металлообрабатывающего оборудования: ГОСТ 20999-83. – Издание официальное. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1983. – 28 с.

V.V. Salnikov, Y.V. Frantsuzova  
**THE ENERGY ANALYSIS NC PROGRAMM FOR MACHINING  
CENTER**

*Tula State University, Tula, Russia*

*The paper considers an approach to the energy analysis of control programs (up) for multi-purpose machines (MCS) with a numerical control system (CNC), the purpose of which is to assess the efficiency of energy consumption when it is performed on a certain equipment. Describes the General approach to programming of CNC systems with the help of ISO-7bit. The description of the grammar of ISO7Bit language is presented with the help of metacharacters for constructing the syntactic and lexical analyzers of the text of the control program on its basis. Considered the authors developed software for analysis of control programs with the goal of getting out of the text up the contour of the workpiece, cutting speed and feed in each point of the trajectory, and calculation of the data obtained cutting power and chart your energy consumption by machine drives system. To demonstrate the capabilities of the developed software, an analysis of the control program obtained at the enterprise of the Tula region was made. As a result, a number of measures are proposed to improve the energy efficiency of its implementation: reducing the "irrational" idle tool strokes and optimizing the feed value at the time of processing the "depression". Directions for further modernization of the developed software are shown.*

**Keywords:** efficiency, energy use efficiency, energy efficiency program operating ISO7Bit

## REFERENCES

1. On some measures to improve energy and environmental efficiency of the Russian economy: the decree of the President of the Russian Federation No. 889 dated June 04, 2008 // meeting of the legislation of the Russian Federation. 2008. No. 23. article 2672.
2. The state program of the Russian Federation "energy Saving and energy efficiency improvement for the period up to 2020": approved by the order of the Government of the Russian Federation dated December 27, 2010 № 2446-R // Collection of legislation of the Russian Federation. 2011. No. 4. article 622.
3. The state program of the Russian Federation "energy Efficiency and energy development": approved by the order of the Government of the Russian Federation dated April 3, 2013 № 512-p // Collection of legislation of the Russian Federation. 2013. No. 14. article 1739
4. Report on the implementation of the state program "energy Efficiency and energy development" // Ministry of energy of the Russian Federation [Electronic resource]. 2017. Mode of access:

<https://minenergo.gov.ru/system/download/323/85150> (date accessed: 18.06.2019)

5. Report on the implementation of the state program "energy Efficiency and energy development" // Ministry of energy of the Russian Federation [Electronic resource]. 2018. Mode of access: <https://minenergo.gov.ru/system/download/323/96991> (date accessed : 18.06.2019)
6. Industry of Russia. 2012: Stat.SB. / Rosstat. - M., 2012.
7. Ivanov V. A. Analysis of energy consumption in various industries // online journal "SCIENCE" Volume 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/144TVN115.pdf> (access is free). Tit. from the screen. Yaz. fair-haired. English. DOI: 10.15862/144TVN115
8. Salnikov V. S. Technological bases of effective energy consumption of production systems. – Tula: Publishing house “Tula polygraphist”, 2003. – 187
9. Salnikov V. V., Frantsuzova V. the Energy performance of certain objects of industrial enterprises // Izvestiya of Tula state University. Technical science. Issue 10. – Tula: Tulgu, 2018. P. 108 – 113.
10. Erzin O. A., Salnikov V. V. One of the aspects of assessment of efficiency of technological systems // Izvestia of the Tula state University. Technical science. Issue 11 part 2. – Tula: Tulgu, 2014. P. 594 – 603.
11. 11.Performance and quality management: Modular program: Per. with ang. /Ed. by I. Prokopenko and K. North: In 2H,–Part I. –M.: Case, 2001. –800C.
12. Fedorov A. A., Rothan E. M. power Supply of industrial enterprises. –M.: Energy, 1981. –360C.
13. Epoetin A. N., Salnikov V. V. the Role of information technology in providing efficient energy enterprises // Izvestiya of Tula state University. Technical science. Issue. 8: at 2 h. 1. Tula: Izd-voTulgu, 2017. – p. 165 – 170
14. Salnikov V. V., Epotin A. N., Frantsuzova V. Computer support use of energy resources in the production system // Izvestiya of Tula state University. Technical Sciences, Vol. 6. Tula: Izd-voTulgu, 2018. – p. 106 – 114
15. Salnikov V. V. Mathematical model of energy consumption of industrial equipment // Intelligent and information systems: Materials of the International scientific and technical conference / Tula state University. – Tula, 2017. – p. 221 – 224
16. Savnikov V. V. Computer based support for efficient use of energy in manufacturing // Proc. 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) 2018, pp. 565-568.

17. ISO 6983-1:2009 (Part 1) Automation system and integration. Numerical control of machines. Program format and definition of address words: Data format for positioning, line motion and contouring control systems // ISO, Geneva
18. Numerical control devices for Metalworking equipment: GOST 20999-83. – Official publication. – М.: ИПК Publishing house of standards, 1983. – 28 p.