

УДК 681.2.083

**СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ НАЛИВНЫХ ГРУЗОВ  
В РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКАХ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ  
ТРАНСПОРТИРОВКИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ**

**METHOD OF MEASUREMENT OF MASS LIQUID CARGO TANK PARKS  
IN SOLVING PROBLEMS OF TRANSPORT AND DISTRIBUTION  
ENERGY RESOURCES**

Солнцева А.В., Борминский С.А., Блинов Д.И., Силов Е.А.

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)»  
г. Самара, Российская Федерация

A.V. Solntceva, S.A. Borminsky, D.I. Blinov, E.A. Silov

FSBEI of HPE “Samara State Aerospace University”, Samara, the Russian Federation  
e-mail: als063@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены основные виды учета жидких энергоносителей, в частности, товарной нефти и нефтепродуктов, а также методики выполнения измерений массы продуктов, указаны основные регламентирующие документы.

Указаны недостатки рассмотренных методик измерения массы продуктов, предложен новый способ измерения массы наливных грузов в резервуарных парках. Способ заключается в определении искомой массы наливного груза исходя из физико-химических характеристик жидких энергоносителей, величины которых передаются в базовый блок соответствующего резервуара, связанный информационным каналом передачи данных с центральным устройством обработки информации.

Описана методика определения массы товарного продукта путем математической обработки данных, полученных при производстве процедуры тарировки емкости резервуарного парка с получением калибровочной таблицы, отображающей связь уровня заполнения резервуара и объема или массы наливаемого/сливаемого продукта. При составлении калибровочной модели измерительного процесса могут быть учтены все влияющие факторы и характеристики, такие как уровень товарного продукта, уровень подтоварной воды, плотность и вязкость продукта, коэффициенты, характеризующие изменение геометрической формы резервуара в результате его наполнения, опорожнения, а также изменения параметров окружающей среды.

Приведено математическое описание измерительного процесса при использовании данных о трех изменяющихся характеристиках нефтепродукта: уровне, плотности и температуре. Рассмотрен конкретный числовой пример измерения массы товарного нефтепродукта - дизельного топлива. Данный пример

получен в рамках проведенных экспериментальных исследований по измерению качественных и количественных параметров жидких товарных нефтепродуктов на танкере IMO7611212 класса река-море, содержащем восемь транспортировочных емкостей.

**Abstract.** The work describes basic control techniques of fluid and liquefied oil products, mineral oil and petroleum products in particular, as well as weight measuring methods for these products, and also main regulatory documents are listed.

Initially, the drawbacks of several measurement methods are described, and further-on, a new method is suggested to measure weight of liquid cargo stored in tanks. The method consists of the following: desired liquid cargo weight is calculated based on physical and chemical parameters of liquid products. The values in question are transferred to the tank's base unit. This unit is connected with a central data processing device by a data transmission channel.

The article analyzes measuring methodology of product weighting by mathematical treatment of data, obtained from tank calibration procedure. Also, a calibration table is obtained, which displays the relationship between the tank's filling level and the volume or weight of a product being poured in or drained. When a measurement calibration model is being built, all influencing factors and characteristics can be taken into consideration. These factors include product's level, level of water produced, product's density and viscosity, coefficients characterizing change in the tank's geometric shape as a result of filling, or emptying, or changes in environmental parameters.

Measurement process is described mathematically, using data on three variable product's characteristics: level, density, and temperature. The work studies a numerical illustration of diesel fuel weight measuring. This study was carried out on IMO7611212 tanker. The tanker is a river-to-sea class. It comprises eight transporting tanks. The aim of experimental studies was to measure quality and quantity of liquid oil products transported by tankers.

**Ключевые слова:** резервуарный парк, измерение массы, жидкий энергоноситель, наливной груз, точность, калибровочная модель, способ.

**Key words:** storage tanks, measurement of mass, liquid energy carrier, liquid cargo, accuracy, calibration model, method.

Производимый на предприятиях учет жидких энергоносителей, чаще всего, товарной нефти и нефтепродуктов можно условно разделить на оперативный и коммерческий. Оперативный учет носит внутренний характер и реализуется в структурных подразделениях предприятий для мониторинга, контроля и оценки деятельности рабочих коллективов. Коммерческий учет производится при совершении операций купли-продажи, поставки, приема товарных продуктов между предприятиями и потребителями, то есть носит внешний характер.

Для реализации этих двух видов учета продукции применяются различные методы и способы измерений, а также предъявляются разные требования, главным образом, к точности. При оперативном учете правила и нормы регламентируются внутренними документами предприятия, то есть устанавливаются либо самим предприятием, либо головной организацией объединения предприятий, в состав которого оно входит. При коммерческом учете требования по методологии и средствам измерения, а также точности, определяются государственными стандартами, нормативной документацией, принятой в установленном порядке, а также требованиями заказчика. В [1] описаны некоторые схемотехнические решения, позволяющие проводить контроль качественных и количественных параметров жидких нефтепродуктов.

Учет нефтепродуктов может производиться в различных единицах, так к примеру, на нефтебазах и наливных станциях учет ведут в единицах массы, а на автозаправочных станциях - в единицах объема.

Для обеспечения достоверности и единства измерений массы нефтепродуктов, а также контроля их качества нефтебазы и АЗС должны иметь необходимое оборудование и средства измерений, допущенные к применению Госстандартом и имеющие клеймо Государственной метрологической службы или соответствующую отметку в паспорте.

В соответствии с межгосударственными стандартами [2, 3, 4] приняты следующие основные определения:

- учетная операция – операция, проводимая поставщиком и потребителем или сдающей и принимающей сторонами, заключающаяся в определении массы продукта для последующих расчетов, при инвентаризации и арбитраже;

- масса брутто товарной нефти – масса товарной нефти, показатели качества которой соответствуют требованиям ГОСТ Р 51858;

- масса балласта – общая масса воды, солей и механических примесей в товарной нефти;

- масса нетто товарной нефти – разность массы брутто товарной нефти и массы балласта.

Существуют следующие методики выполнения измерений массы нефти и нефтепродуктов:

- прямой метод динамических измерений;

- косвенный метод динамических измерений;

- прямой метод статических измерений;

- косвенный метод статических измерений;

- косвенный метод, основанный на гидростатическом принципе.

Прямой метод динамических измерений заключается в непосредственном измерении массы продукта с помощью массомера в трубопроводе.

Косвенный метод динамических измерений заключается в определении массы продукта по результатам следующих измерений в трубопроводе:

а) плотности с помощью поточных преобразователей плотности, давления и температуры;

б) объема продукта с помощью преобразователей расхода, давления и температуры или счетчиков жидкости [2].

Варианты методов и устройств контроля плотности, объема и других показателей нефти и нефтепродуктов описаны в [4].

Результаты измерений плотности и объема продукта приводят к стандартным условиям или результат измерений плотности продукта приводят к условиям измерений его объема.

Прямой метод статических измерений заключается в определении массы продукта по результатам взвешивания на весах.

Косвенный метод статических измерений заключается в определении массы продукта по результатам следующих измерений:

а) в мерах вместимости (под мерой вместимости подразумевается средство измерений объема продукта, имеющее свидетельство о поверке и утвержденную градуировочную таблицу):

- уровня продукта – стационарным уровнемером или какими-либо другими средствами измерений уровня жидкости;

- плотности продукта – переносным или стационарным средством измерений плотности или ареометром по ГОСТ 3900, ГОСТ 31072 или лабораторным плотномером в объединенной пробе, составленной из точечных проб, отобранных по ГОСТ 2517;

- температуры продукта – термометром в точечных пробах или с помощью переносного или стационарного преобразователя температуры;

- объема продукта – по калибровочной таблице меры вместимости с использованием результата измерений уровня продукта;

б) в мерах полной вместимости (под мерой полной вместимости подразумевается средство измерений объема продукта, имеющее свидетельство о поверке и оснащенное указателем уровня наполнения):

- плотности продукта – переносным средством измерений плотности или ареометром в лаборатории по ГОСТ 3900, ГОСТ 31072 или лабораторным плотномером в точечной пробе продукта, отобранной по ГОСТ 2517;

- температуры продукта – переносным преобразователем температуры или термометром в точечной пробе продукта, отобранной по ГОСТ 2517;

- объема продукта, принятого равным действительной вместимости меры, значение которой нанесено на маркировочную табличку и указано в свидетельстве о поверке, с учетом изменения уровня продукта относительно указателя уровня.

Косвенный метод, основанный на гидростатическом принципе, заключается в определении массы продукта в мерах вместимости по результатам измерений:

- гидростатического давления столба продукта – стационарным измерителем гидростатического давления;

- уровня продукта – переносным или другим средством измерений уровня.

В соответствии с требованиями ГОСТ 8.587-2006 предел допускаемой относительной погрешности измерений массы брутто товарной нефти и массы нефтепродукта при косвенном методе статических измерений продукта массой до 120 т должен составлять 0,65%, а при измерении продукта массой свыше 120 т – 0,5% [2].

Недостатком существующих методик выполнения измерений является присутствие погрешности, обусловленной тем, что вычисления конечного результата производятся по алгоритмам, не учитывающим в полной мере взаимосвязи плотности, температуры, вязкости, уровня подтоварной жидкости (балласта) с массой товарного продукта при изменяющихся внешних и внутренних условиях.

Авторами настоящей статьи предложен новый способ измерения массы жидкости в резервуаре [5]. Способ заключается в определении искомой массы исходя из параметров, характеризующих физико-химические характеристики хранимой жидкости (уровень, температуру, градиент температур, плотность, вязкость, уровень подтоварной жидкости и другие специфические параметры), величины которых передаются в базовый блок соответствующего резервуара, связанный информационным каналом передачи данных с центральным устройством обработки информации. Совокупность физико-химических параметров, соответствующих определенным порциям жидкости с заведомо известными массами, измеряется в процессе калибровки, а значения этих параметров запоминаются в центральном устройстве обработки.

Зависимость массы  $M$  контролируемого товарного продукта и совокупности измеряемых влияющих параметров, таких как уровень контролируемой и подтоварной жидкостей, их плотность, вязкость, температура, градиент температур по глубине, диэлектрическая проницаемость и другие, которые можно оперативно измерить известной датчиковой аппаратурой, может быть представлена в виде выражения:

$$M = F(q_1, \dots, q_k, \dots, q_n), \quad (1)$$

где  $q_k$  – совокупность измеряемых параметров.

Авторами был разработан алгоритм проведения измерений (рисунок 1), с учетом того, что любой измерительный процесс кроме сбора и обработки информации по определению также подразумевает и операцию калибровки по эталонам.

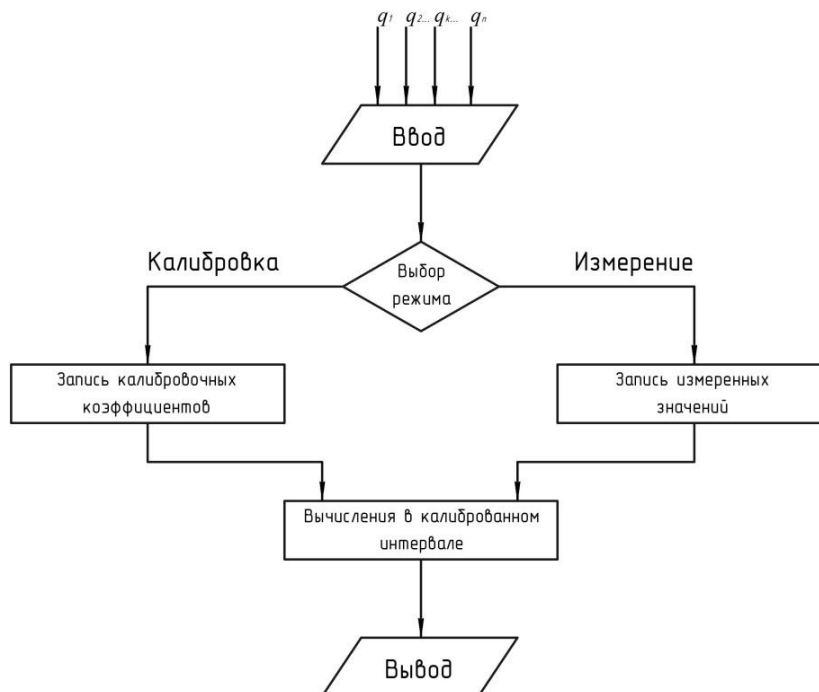


Рисунок 1. Алгоритм измерений предлагаемым способом

Сущность алгоритма состоит в том, что для нахождения функции преобразования при неизвестной функции  $F$  составляется калибровочная модель процесса измерения. Для этого в резервуар  $i$  раз поэтапно наливают количество жидкости известной массы  $M_i$ , измеряют соответствующую ей совокупность контролируемых физико-химических параметров  $q_{k,i}$ , где  $k$  – номер измеряемого параметра ( $k=1 \dots m$ ),  $i$  – номер калибровочного замера ( $i=1 \dots n$ ), значения которых запоминаются в центральном устройстве обработки. Количество эталонных замеров  $n$  должно быть не меньше числа контролируемых параметров  $m$ , то есть  $n \geq m$ .

Пусть имеется  $n$  калибровочных наливов жидкости с известными значениями массы  $M_1, \dots, M_i, \dots, M_n$ . При этом следует помнить, что  $M_i = M_{i-1} + \Delta M$ , где  $\Delta M$  – фиксированное приращение массы на каждом этапе калибровки. При каждом наливе контролируются совокупность параметров мониторинга резервуара  $q_{k,i}$ . Отметим, что при каждом очередном наливе физико-химические параметры жидкости будут меняться, так как процесс налива при больших объемах резервуара длительный, то будет меняться температура  $T$ , и, соответственно, плотность  $\rho$  и вязкость  $\eta$  основного и подтоварного продуктов.

При построении калибровочной модели для произвольных значений измеряемых параметров всегда можно подобрать такие нормирующие коэффициенты  $b_k$ , что будут выполняться равенства:

$$\begin{aligned}
 M_1 &= b_1 q_{1,1} + \dots + b_k q_{k,1} + \dots + b_m q_{m,1} = \sum_{k=1}^m b_k q_{k,1} \\
 M_i &= b_1 q_{1,i} + \dots + b_k q_{k,i} + \dots + b_m q_{m,i} = \sum_{k=1}^m b_k q_{k,i} \\
 M_m &= b_1 q_{1,m} + \dots + b_k q_{k,m} + \dots + b_m q_{m,m} = \sum_{k=1}^m b_k q_{k,m} \\
 M_n &= b_1 q_{1,n} + \dots + b_k q_{k,n} + \dots + b_m q_{m,n} = \sum_{k=1}^m b_k q_{k,n}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Система (2) имеет  $n$  уравнений для  $m$  неизвестных  $b_k$ . Так как число эталонных замеров всегда можно сделать больше числа контролируемых параметров  $n \geq m$ , то из данной системы всегда можно выбрать достаточное количество уравнений, из которых можно найти коэффициенты  $b_k$ . Желательно, чтобы выбранные для совместного решения уравнения по возможности охватывали больший диапазон контролируемых параметров. Решение этой системы дает совокупность коэффициентов  $b_k$ , которые в средневзвешенной форме определяют искомый показатель качества. Система (2) имеет единственное решение, если главный определитель отличен от нуля. Решением этого уравнения является соотношение:

$$b_k = \frac{\Delta b_k}{\Delta}, \tag{3}$$

Где:

$$\Delta = \begin{vmatrix} q_{1,1} \dots q_{k,1} \dots q_{n,1} \\ \dots \dots \dots \\ q_{1,i} \dots q_{k,i} \dots q_{n,i} \\ \dots \dots \dots \\ q_{1,n} \dots q_{k,n} \dots q_{n,n} \end{vmatrix}, \quad \Delta b_k = \begin{vmatrix} q_{1,1} \dots M_1 \dots q_{n,1} \\ \dots \dots \dots \\ q_{1,i} \dots M_i \dots q_{n,i} \\ \dots \dots \dots \\ q_{1,n} \dots M_n \dots q_{n,n} \end{vmatrix}.$$

Учитывая независимость получения измерительной информации и возможность варьирования сигналов датчиков всегда можно исключить равенство нулю главного определителя в заданном диапазоне измерения.

Вычисленные таким образом коэффициенты  $b_k$  согласно представленному на рисунке 1 алгоритму запоминаются в устройстве обработки и используются в дальнейшем в процедуре измерения. В процессе определения массы



контролируемой жидкости измеряются параметры мониторинга  $q_{k,X}$ , а неизвестная масса нефтепродукта может быть определена по формуле (5)

$$M_X = b_1 q_{1,X} + \dots + b_k q_{k,X} + \dots + b_m q_{m,X} = \sum_{k=1}^m b_k q_{k,X} \quad (4)$$

возможность применения которой обусловлена системой (2). Выражение (5) составляет в общем виде математическую модель измерительного процесса определения массы товарной жидкости по калибровочной модели и является конкретной формой реализации обобщенной функции преобразования (1).

При любых значениях  $\min < q_{k,i} < \max$  искомое значение находится в интервале  $M_{\min} < M_X < M_{\max}$ , что полностью подпадает под определение измерительного процесса, как фактора уменьшения неопределенности. Доказано, что при любом количестве калибровочных отсчетов, равных числу используемых для мониторинга резервуара параметров, искомый параметр будет находиться в интервале  $M_{\min} \div M_{\max}$ . Таким образом, предложенный способ измерений не требует точного знания функции, связывающей искомую массу жидкости с измеряемыми косвенными параметрами. Он предполагает создание математической модели в процессе калибровки. Чем больше параметров мы измеряем, и чем больше число калибровочных отсчетов, тем выше точность измерений [6].

Рассмотрим вариант измерения массы товарного продукта в резервуаре при условии контроля трех изменяющихся параметров: уровня заполнения резервуара, плотности и температуры продукта. Измерение уровня может быть проведено согласно [7]. Тогда неизвестная масса продукта будет измеряться согласно формуле:

$$M_X = b_1 H_X + b_2 \rho_X + b_3 T_X, \quad (5)$$

где коэффициенты  $b_k$  по формуле (3) с определителями:

$$\Delta = \begin{vmatrix} H_1 & \rho_1 & T_1 \\ H_2 & \rho_2 & T_2 \\ H_3 & \rho_3 & T_3 \end{vmatrix}, \quad \Delta b_1 = \begin{vmatrix} M_1 & \rho_1 & T_1 \\ M_2 & \rho_2 & T_2 \\ M_3 & \rho_3 & T_3 \end{vmatrix},$$

$$\Delta b_2 = \begin{vmatrix} H_1 & M_1 & T_1 \\ H_2 & M_2 & T_2 \\ H_3 & M_3 & T_3 \end{vmatrix}, \quad \Delta b_3 = \begin{vmatrix} H_1 & \rho_1 & M_1 \\ H_2 & \rho_2 & M_2 \\ H_3 & \rho_3 & M_3 \end{vmatrix}$$

Важно, что при проведении измерений для каждого отсчета должны выбираться максимально близкие по значению точки из памяти калибровочной модели. Только в таком случае, возможно, получить высокие по точности



данные. Погрешность будет расти в зависимости от того, насколько далеко от измеряемого параметра находятся отсчета калибровочной модели.

Пример. Были проведены экспериментальные исследования в рамках подтверждения разработанной теории. Были проведены измерения массы товарного продукта – дизельного топлива на танкере IMO7611212 класса река-море. Данные приведены в таблице 1.

Таблица 1. Пример производимых измерений согласно разработанному способу

Данные калибровочной модели				Измерение
H, м	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	T, град С	M, кг	
H <sub>1</sub> =0,10	$\rho_1=860$	T <sub>1</sub> =25.1	M <sub>1</sub> =1832	H <sub>x</sub> =0.14
H <sub>2</sub> =0,13	$\rho_2=860$	T <sub>2</sub> =25.2	M <sub>2</sub> =2460	$\rho_x=860$
H <sub>3</sub> =0,15	$\rho_3=860$	T <sub>3</sub> =25.1	M <sub>3</sub> =2898	T <sub>x</sub> =25.1

При измерении, характеризующемся параметрами, приведенными в столбце «Измерение», из памяти калибровочной модели были взяты данные, приведенные в первых трех столбцах. В результате применения разработанного способа измерения массы, было получено значение  $M_x = 2685$  кг. После анализа имеющейся калибровочной таблицы было установлено, что разработанный способ дает более точный результат в определении массы, чем использование заранее подготовленной калибровочной таблицы, в силу того, что дает возможность учесть быстроменяющиеся факторы, в данном примере – температуру (по калибровочной таблице  $M_x = 2674$  кг). На практике применения калибровочной таблицы учесть этот фактор не предоставляется возможности, в силу измерения температуры окружающей среды и продукты за все время проведения процедуры калибровки.

### Выводы

Предлагаемый способ измерения массы товарных продуктов позволяет значительно повысить точность измерений и, следовательно, качество учётных операций, в частности может быть эффективно использован для оперативного определения массы нефтепродуктов в резервуарах по различным параметрам, косвенно связанным с искомой величиной при изменяющихся условиях внешней и внутренней среды, а также предупредить факты перелива/недолива и кражи продукта из резервуарных парков.

*Исследования выполнены при поддержке Министерства образования и науки РФ*

### Список используемых источников

1. Скворцов Б.В., Борминский С.А. Импульсные методы измерения количества и качества жидких углеводородных топлив. Самара: изд-во СНЦ РАН, 2010. 220 с.
2. ГОСТ Р 8.595-2004. Масса нефти и нефтепродуктов. Общие требования к методикам выполнения измерений. М., 2005. II, 27 с. (Государственная система обеспечения единства измерений).
3. ГОСТ Р 8.615-2005. Измерения извлекаемой из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования. М., 2006. III, 23 с. (Государственная система обеспечения единства измерений).
4. ГОСТ Р 8.563-96. Методики выполнения измерений. М., 1996. - II, 23 с. (Государственная система обеспечения единства измерений).
5. Способ измерения массы жидкости в резервуаре / Скворцов Б.В. и др.: заявка на изобретение № 2011147442/28; заявл.22.11. 11 ; опубл. 27.05. 13. Бюл. №15. 2с.
6. Борминский С.А., Скворцов Б.В., Солнцева А.В. Методы измерений количественных и качественных характеристик жидких энергоносителей. Самара: изд-во СНЦ РАН, 2012. 222 с.
7. Устройство для измерения уровня жидкости в резервуарах / Скворцов Б.В. и др. : пат. 115886, Рос. Федерация. № 2011151843/28; заявл. 19.12.11; опубл. 10.05.12. Бюл. 13. 2 с.

### References

1. Skvorcov B.V., Borminsky S.A. Impul'snye metody izmerenija kolichestva i kachestva zhidkih uglevodorodnyh topliv. Samara: izdatel'stvo SNC RAN, 2010. 220 s. [in russian].
2. GOST R 8.595-2004. Massa nefti i nefteproduktov. Obshhie trebovanija k metodikam vypolnenija izmerenij. M., 2005. II, 27 s. (Gosudarstvennaja sistema obespechenija edinstva izmerenij). [in russian].
3. GOST R 8.615-2005. Izmerenija izvlekaemoj iz neдр nefti i neftjanogo gaza. Obshhie metrologicheskie i tehicheskie trebovanija. M., 2006. III, 23 s. (Gosudarstvennaja sistema obespechenija edinstva izmerenij) [in russian].
4. GOST R 8.563-96. Metodiki vypolnenija izmerenij. M., 1996. II, 23 s. (Gosudarstvennaja sistema obespechenija edinstva izmerenij). [in russian].
5. Sposob izmerenija massy zhidkosti v rezervuare / Skvorcov B.V., Borminsky S.A., Solntceva A.V., Blinov D.I.: zajavka na izobretenie № 2011147442/28; zajavl.22.11. 11 ; opubl. 27.05. 13. Bjul. №15. 2s. [in russian].

6. Borminsky S.A., Skvorcov B.V., Solntceva A.V. Metody izmerenij kolichestvennyh i kachestvennyh harakteristik zhidkih jenergonositelej. Samara: izdatel'stvo SNC RAN, 2012. 222 s. [in russian].

7. Ustrojstvo dlja izmerenija urovnja zhidkosti v rezervuarah / Skvorcov B.V., Blinov D.I., Solntceva A.V., Borminsky S.A.: pat. 115886, Ros. Federacija. № 2011151843/28; zajavl. 19.12.11 ; opubl. 10.05.12. Bjul. 13. 2 s. [in russian].

**Сведения об авторах**  
**Information about authors**

Солнцева А.В., аспирант кафедры электротехники СГАУ, г. Самара, Российская Федерация

A.V. Solntceva, Graduate Student of the Chair of Electrical Engineering SSAU, Samara, the Russian Federation

Борминский С.А., канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники СГАУ, г. Самара, Российская Федерация

S.A. Borminsky Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Chair of Electrical Engineering SSAU, Samara, the Russian Federation

Блинов Д.И., аспирант кафедры электротехники СГАУ, г. Самара, Российская Федерация

D.I. Blinov, Graduate Student of the Chair of Electrical Engineering SSAU, Samara, the Russian Federation

Силов Е.А., канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник СГАУ, г. Самара, Российская Федерация

E.A. Silov Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher SSAU, Samara, the Russian Federation

e-mail: als063@mail.ru