

ЕЛЕКТРОТЕХНИКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.341.572

Бурлака В.В.¹, Гулаков С.В.², Федоровская С.А.³

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ КОРРЕКТОРОМ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ ФУНКЦИЯМИ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА

Предложен метод управления однофазным корректором коэффициента мощности (ККМ), позволяющий ограниченно интегрировать в него функции параллельного активного фильтра. Особенности разработанного метода является учет характерных особенностей ККМ: невозможность работы с отрицательной мгновенной активной мощностью и отсутствие датчиков тока нелинейных нагрузок.

Ключевые слова: корректор коэффициента мощности, параллельный активный фильтр.

Бурлака В.В., Гулаков С.В., Федоровська С.О. Метод керування коректором коефіцієнта потужності з інтегрованими функціями активного фільтру. Запропоновано метод керування однофазним коректором коефіцієнта потужності (ККП), який дозволяє обмежено інтегрувати в нього функції паралельного активного фільтру. Особливостями розробленого методу є врахування особливостей ККП: неможливість роботи з негативною миттєвою активною потужністю та відсутність датчиків струму нелінійних навантажень.

Ключові слова: коректор коефіцієнта потужності, паралельний активний фільтр.

V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, S.A. Fedorovskaya. Control method for power factor corrector with integrated active power filter functionality. A new control method for single-phase power factor corrector (PFC), which allows for limited integration of the parallel active power filter functionality, is proposed. The developed control method deals with the unique PFC features: impossibility of working with negative instantaneous active power and absence of nonlinear loads' current sensors.

Keywords: power factor corrector, parallel active power filter.

Постановка проблемы. Современным решением проблемы снижения уровня высших гармоник в сети, компенсации реактивной мощности и симметрирования токов нагрузки является применение активных фильтров (АФ) и статических компенсаторов (СТАТКОМ). Но широкое применение этих устройств сдерживается их высокой стоимостью.

Введение современных стандартов качества электроэнергии [1 – 3] определяет интенсивное развитие схемотехники выпрямителей с активной коррекцией коэффициента мощности, т.н. корректоров коэффициента мощности (ККМ). Наибольшее распространение среди однофазных систем получили ККМ на основе повышающего преобразователя (т.н. Boost-type PFC, рис. 1).

подавляющее большинство таких систем ведут себя по отношению к питающей сети как линейное активное сопротивление (рис. 2, а). Существует также небольшое количество ККМ (например, на основе управляющей микросхемы *Mitsubishi M81012FP*) [4], ведущих себя как источники синусоидального тока первой гармоники (рис. 2, б).

В обоих случаях ККМ не оказывает активного влияния на спектральный состав питающего напряжения (а в случае, показанном на рис. 2, б, коэффициент гармоник напряжения

¹ канд. техн. наук, ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь.

² д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь.

³ ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь.

THD_U может увеличиться из-за снижения амплитуды основной гармоники).

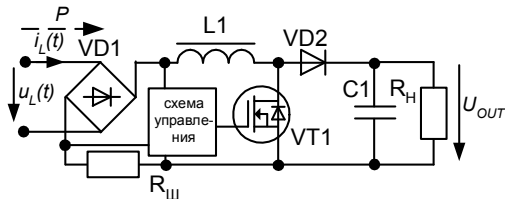


Рис. 1 – Типовая схема силовой части однофазного ККМ на основе повышающего (boost) преобразователя

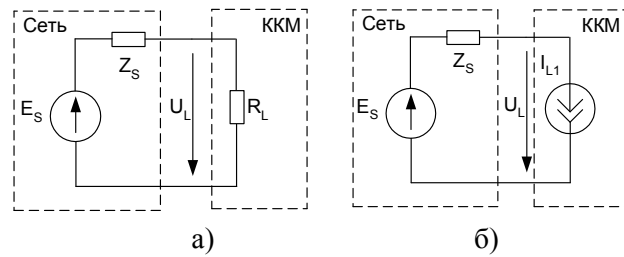


Рис. 2 – ККМ, эмулирующий: а) активное сопротивление; б) источник тока 1-й гармоники

Поскольку современные сети изобилуют нелинейными нагрузками, встает задача компенсации их негативного влияния.

Так, на сегодняшний день имеется большое количество нагрузок, использующих промежуточное преобразование переменного питающего напряжения в постоянное. Обычно это преобразование осуществляется путем установки диодного моста и емкостного фильтра. Потребляемый ток такой нагрузки имеет ярко выраженные нечетные гармоники, преимущественно 3-ю и 5-ю, а типовой коэффициент мощности лежит в пределах (0,5...0,7). Наличие большого количества таких потребителей приводит к искажению формы кривой питающего напряжения, перегрузке нулевого провода и т.п. В достаточной степени устранить негативное влияние на сеть нелинейных нагрузок и довести параметры качества до современных требований с помощью пассивных средств не всегда представляется возможным. Радикальным решением проблемы является установка активных фильтров высших гармоник и/или оснащение потребителей корректорами коэффициента мощности.

Анализ последних исследований и публикаций. АФ в настоящее время строятся с применением четырехквadrантных инверторов. Это продиктовано необходимостью обеспечить двунаправленный поток мгновенной активной мощности и приводит к усложнению силовой части и системы управления ею.

Силовая часть ККМ, в свою очередь, оптимизирована для работы только при положительной мгновенной активной мощности (в 1-м и 3-м квадрантах), что делает невозможным применение для нее классических алгоритмов управления АФ.

Кроме особенностей силовой части, параллельные АФ обычно требуют установки датчиков тока компенсируемых нелинейных нагрузок. Впрочем, необходимость датчиков тока может быть устранена путем перевода инвертора параллельного АФ в режим источника напряжения, как это показано в [5].

Цель статьи – создание метода управления ККМ, позволяющего интегрировать в него функции параллельного АФ, обеспечить стабилизацию выходного напряжения ККМ, работу с положительной входной мгновенной активной мощностью и ограничение входного тока инвертора ККМ. Система управления должна работать в условиях отсутствия информации о токах нелинейных нагрузок, подключенных к той же сети.

Изложение основного материала. Для решения поставленной задачи предложено изменить алгоритм работы схемы управления ККМ с целью снижения имитируемого входного сопротивления.

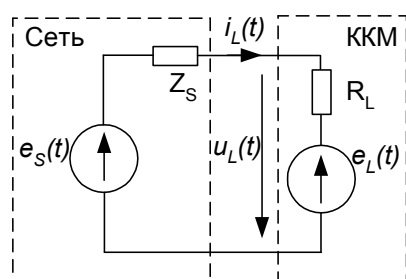


Рис. 3 – Схема замещения разработанного ККМ

С этой целью формирование входного тока ККМ $i_L(t)$ производится в соответствии со схемой замещения, приведенной на рис. 3. ККМ по отношению к сети ведет себя как активное сопротивление R_L (аналогично рис. 1), но имеет собственную ЭДС $e_L(t)$, содержащую в своем спектре только первую гармонику частоты питающей сети.

Источник ЭДС $e_L(t)$ синхронизирован с помощью петли ФАПЧ с питающей сетью:

$$e_L(t) = E_R \sin \omega t, \quad (1)$$

где ω – круговая частота сети, c^{-1} ;
 E_R – задание на амплитуду, В.

При этом входной ток ККМ равен

$$i_L(t) = \frac{u_L(t) - e_L(t)}{R_L(E_R, P)}, \quad (2)$$

где $R_L(E_R, P)$ – имитируемое входное сопротивление ККМ, Ом.

Величина задания амплитуды E_R выбирается таким образом, чтобы мгновенная активная мощность ККМ была всегда положительной: $i_L(t) \cdot u_L(t) > 0$ (условие корректной работы инвертора ККМ, см. выше), что позволяет использовать разработанный метод управления для практически всех существующих топологий силовой части активных ККМ с прямым управлением входным током.

Величина $R_L(E_R, P)$ определяется из условия баланса мощности (необходимое условие стабилизации выходного напряжения):

$$\frac{\omega}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi/\omega} u_L(t) \frac{u_L(t) - e_L(t)}{R_L(E_R, P)} dt = P, \quad (3)$$

где P – потребляемая от сети мощность, Вт.

Цепи формирования сигналов E_R и $R_L(E_R, P)$ не должны допускать быстрых изменений этих параметров.

По сравнению с «классическим» ККМ (рис. 1) получающаяся при той же мощности величина R_L будет меньше. Таким образом, из-за сниженного входного сопротивления ККМ будет оказывать повышенное шунтирующее действие для токов высших гармоник по аналогии с параллельным активным фильтром.

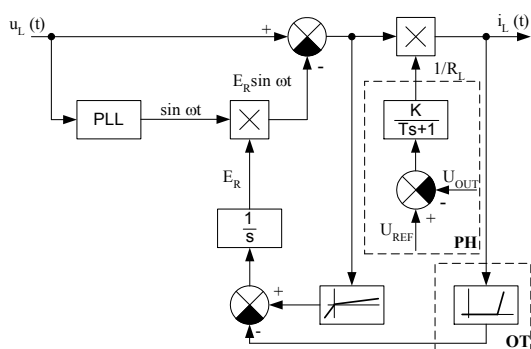


Рис. 4 – Структурная схема разработанной системы управления ККМ

Структурная схема системы управления, реализующей разработанный метод, приведена на рис. 4. Опорный сигнал первой гармоники напряжения сети выделяется с помощью петли ФАПЧ (PLL, рис. 4) и вместе с заданием на амплитуду (E_R) подается на перемножитель, выход которого подключен к сумматору-вычитателю, который формирует разностный сигнал $u_L(t) - e_L(t)$. Этот сигнал подается на второй перемножитель, работающий совместно с ПИ-регулятором выходного напряжения ККМ (PH, рис. 4) и формирующий сигнал задания входного тока ККМ $i_L(t)$.

Сигнал E_R формируется цепью местной отрицательной обратной связи, содержащей звено с переключаемым в зависимости от полярности входного сигнала коэффициентом передачи и интегратор. Постоянная времени цепи ОС по E_R должна значительно превышать период сетевого напряжения (т.е. E_R не должно значительно изменяться в течение периода).

Узел ограничения тока (ОТ, рис. 4) с пороговым звеном уменьшает задание на амплитуду E_R в случае недопустимого повышения входного тока. Поскольку этот ограничитель тока имеет задержку из-за интегратора E_R , быстродействующее аппаратное ограничение тока должно быть также выполнено непосредственно в схеме управления силовым ключом (или ключами).

Для повышения быстродействия регуляторов выходного напряжения U_{OUT} и задания на амплитуду E_R возможна установка в цепях обратных связей устройств выборки-хранения (УВХ). Эффект от применения УВХ в цепи ОС по выходному напряжению ККМ (U_{OUT}) описан в [6]. Структурная схема модифицированной системы управления приведена на рис. 5.

АЧХ УВХ определяется как [7]:

$$A(\omega) = \left| \frac{1 - e^{-j\omega T}}{j\omega} \right|, \quad (4)$$

где T – период дискретизации, с.

АЧХ имеет нули на частотах $\omega = \frac{2\pi k}{T}$, где k – целое число.

Таким образом, в сигнале задания E_R подавлены все гармоники частоты сети, в результате чего он содержит только медленно меняющуюся постоянную составляющую, что и необхо-

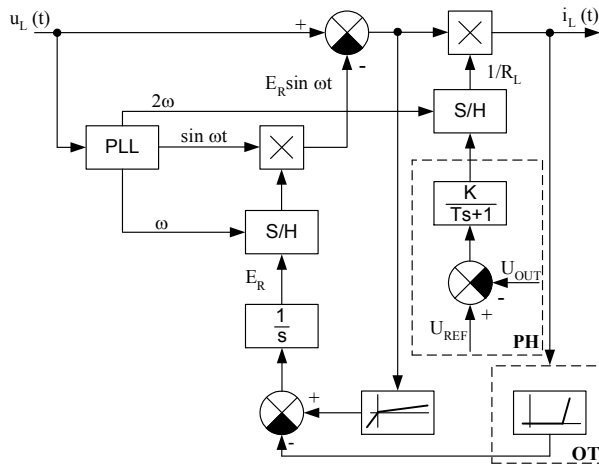


Рис. 5 – Структурная схема системы управления ККМ с повышенным быстродействием и улучшенным качеством формирования сигнала задания входного тока

Эффект объясняется тем, что в случае, показанном на рис. 6, б, часть высших гармоник тока нелинейной нагрузки замыкается через ККМ, а не через питающую сеть.

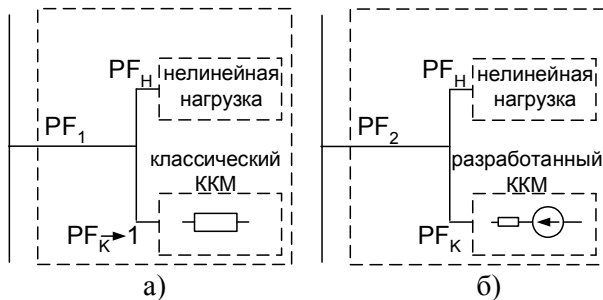


Рис. 6 – Применение разработанного ККМ с нелинейной нагрузкой

вуют действующему в Украине ГОСТ 13109-97 сразу по нескольким показателям (отклонение напряжения, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициент 3-й гармонической составляющей напряжения).

Для большей наглядности на рис. 8 показаны напряжение сети и входной ток ККМ с отфильтрованной основной гармоникой. Как видно из рис. 8, в напряжении сети (u_L) ярко выражены высшие гармоники, вызванные большим количеством нескорректированной выпрямительной нагрузки. ККМ реагирует на такое напряжение появлением высших гармоник входного тока (i_L), причем фазы этих токов противоположны фазам токов, вызвавших искажения формы кривой напряжения.

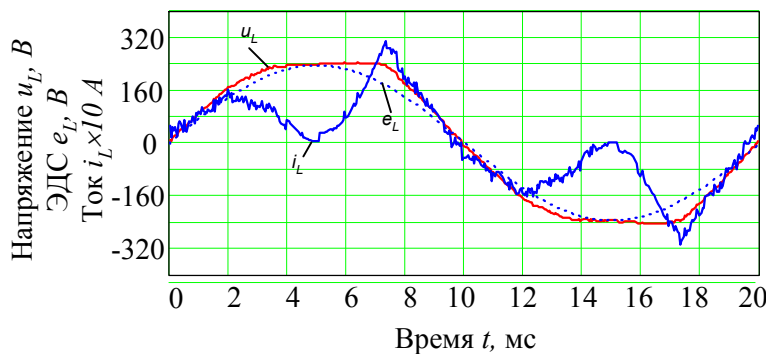


Рис. 7 – Диаграмма, иллюстрирующая работу ККМ с разработанной авторами системой управления при искаженном напряжении сети

Аналогично в сигнале ОС по U_{OUT} подавлены все четные гармоники частоты сети, что устраняет влияние пульсаций выходного напряжения на спектральный состав входного тока ККМ [6].

На рис. 6 показан пример эффекта от замены классического ККМ (рис. 1) на ККМ с описанной системой управления. Замена классического ККМ (рис. 6, а) на ККМ с разработанной авторами системой управления (рис. 6, б) приводит к повышению общего коэффициента мощности $PF_2 > PF_1$. Таким образом, коэффициент мощности системы «нелинейная нагрузка + разработанный ККМ» будет выше, чем у системы «нелинейная нагрузка + классический ККМ», несмотря на то, что коэффициент мощности разработанного ККМ будет заметно ниже единицы.

На рис. 7 приведены результаты моделирования работы разработанного авторами алгоритма управления ККМ в условиях искаженного напряжения сети (вторичное напряжение подстанции МТП-514 г. Мариуполя 27.01.2011 г. 19:19; среднеквадратичное напряжение $U_{RMS} = 187$ В; $THD_U = 9\%$ (при этом коэффициент 3-й гармоники составляет 8,2 %); потребляемая мощность ККМ $P = 2$ кВт при коэффициенте мощности $PF_K = 0,818$). Следует отметить, что параметры качества напряжения не соответ-

ствуют действующему в Украине ГОСТ 13109-97 сразу по нескольким показателям (отклонение напряжения, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициент 3-й гармонической составляющей напряжения). Для большей наглядности на рис. 8 показаны напряжение сети и входной ток ККМ с отфильтрованной основной гармоникой. Как видно из рис. 8, в напряжении сети (u_L) ярко выражены высшие гармоники, вызванные большим количеством нескорректированной выпрямительной нагрузки. ККМ реагирует на такое напряжение появлением высших гармоник входного тока (i_L), причем фазы этих токов противоположны фазам токов, вызвавших искажения формы кривой напряжения. На рис. 9 приведены спектральные составы напряжения питания и входного тока ККМ. Очевидно значительное превышение уровня высших гармоник входного тока над уровнем гармоник напряжения питания ($THD_U = 9,1\%$, $THD_I = 82,5\%$). Это вызвано «стремлением» разработанного авторами ККМ увеличить долю мощности, переносимой высшими гармониками. Эта доля мощно-

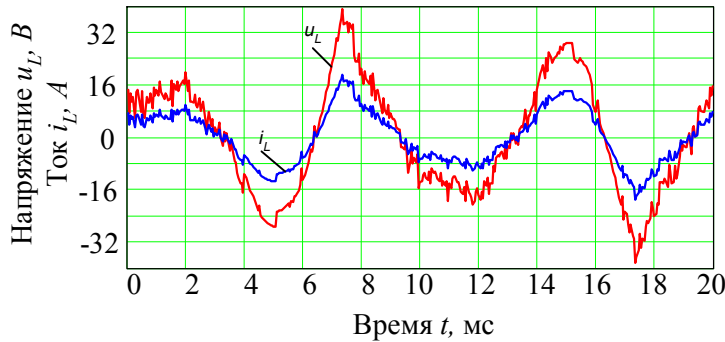


Рис. 8 – Напряжение сети и входной ток ККМ с отфильтрованной основной гармоникой

риваемого случая составляет всего 0,8 %, а для случая ККМ рис. 2, б мощность, потребляемая на высших гармониках напряжения, равна нулю.

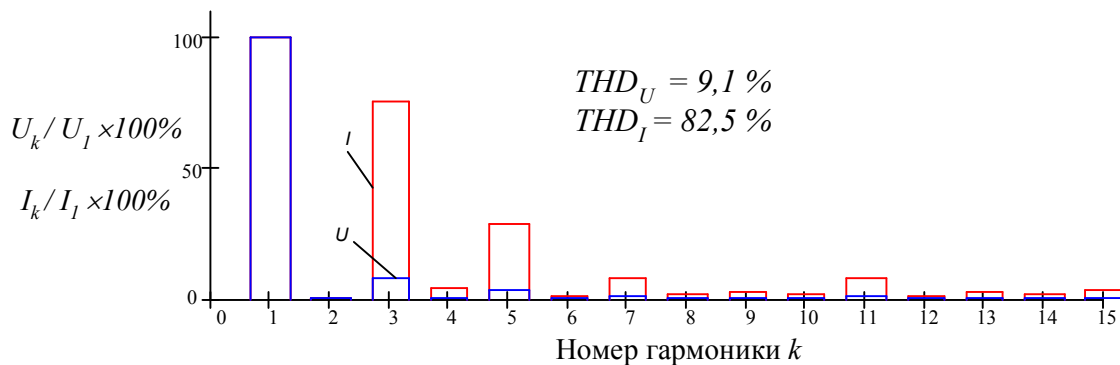


Рис. 9 – Спектральный состав входных напряжения и тока ККМ. Уровень первой гармоники принят за 100 %

Эффект повышения доли мощности высших гармоник связан с уменьшением входного сопротивления ККМ R_L . В рассматриваемом случае разработанный ККМ работает с параметрами $E_R = 235$ В, $R_L = 2,03$ Ом. В то же время «классический» ККМ (рис. 2, а) имел бы в аналогичных условиях $R_L = \frac{U_{RMS}^2}{P}$, что составляет 17,48 Ом.

В случае «чистой» сети (при незначительном уровне высших гармоник напряжения) работа разработанного ККМ полностью аналогична «классическому», т.е. в спектре входного тока будет присутствовать только первая гармоника.

Выводы

Разработанный авторами метод управления активным ККМ позволяет ограниченно интегрировать в него функции параллельного активного фильтра без датчиков тока, что приводит к улучшению спектрального состава напряжения питающей сети. Метод может быть применен для практически всех известных топологий ККМ, в которых реализовано прямое управление входным током.

Дальнейшим направлением исследований является создание аналогичных методов и систем управления для 3-фазных активных ККМ, а также для источников питания с непосредственным преобразованием [8 – 10], что позволит повысить качество электроэнергии и улучшить условия работы иных нагрузок, подключенных к той же сети.

Список использованных источников:

- ГОСТ Р 51317.3.2-2006 (МЭК 61000-3-2:2005). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний.

сти может быть определена как

$$P_k^* = 1 - \frac{U_{1m}(U_{1m} - E_R)}{2R_L \cdot P}, \quad (5)$$

где U_{1m} – амплитуда первой гармоники напряжения сети, В.

Так, для приведенного случая 7,9 % мощности нагрузки обеспечиваются высшими гармониками напряжения. В то время как при чисто активной нагрузке (ККМ рис. 2, а) эта доля будет определяться

как $1 - \frac{1}{1 + THD_U^2}$, что для рассмат-

2. ГОСТ Р 51317.3.4-2006 (МЭК 61000-3-4:1998). Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение эмиссии гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током более 16 А, подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний.
3. ГОСТ Р 51317.3.12-2006 (МЭК 61000-3-12:2004). Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения общего назначения. Нормы и методы испытаний.
4. DIP-PFC Application Note // Mitsubishi Electric Corporation: Power Semiconductor Device Division. – Doc. No. DPH-2365-e.
5. *Routimo M.* Current sensorless control of a voltage-source active power filter / *M. Routimo, M. Salo, H. Tuusa* // In proc. APEC'2005, 6-10 march 2005. – Vol.3, pp. 1696 – 1702.
6. *Бурлака В.В.* Активный корректор коэффициента мощности с повышенным быстродействием регулятора напряжения / *В.В. Бурлака, С.В. Гулаков* // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій “РТ-2010”: Матеріали 6-ої міжнар. молодіжної наук.-техн. конф. 19 – 24 квітня 2010 р. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – с. 54.
7. *Туманов М.П.* Теория импульсных, дискретных и нелинейных систем автоматического управления: Учебное пособие / *М.П. Туманов* – М.: МГИЭМ, 2005. – 63 с.
8. Патент №92420 України на винахід. МПК H02H 7/09 Трифазний випрямлювач зварювального струму з безпосереднім перетворенням / *В.В. Бурлака, С.В. Гулаков*, заявитель и патентообладатель Приазовский государственный технический университет – № а 2009 07499; заявл. 17.07.2009; опубл. 25.10.2010. – Бюл. № 20. – 4 с.
9. *Бурлака В.В.* Перспективные сварочные источники с трехфазным питанием / *В.В. Бурлака, С.В. Гулаков* // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – № 2 (19). – С. 48-51.
10. *Бурлака В.В.* Трехфазный обратноходовый источник питания с активной коррекцией коэффициента мощности / *В.В. Бурлака, С.В. Гулаков* // «Актуальні задачі сучасних технологій»: міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів, Тернопіль, 21-22 грудня 2010 р. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2010. – С. 109.

Рецензент: Ю.Л. Саенко
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ЛГТУ»

Статья поступила 28.03.2011