

УДК: 621.31

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕКАЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Ю. Г. КачанЗапорожская государственная инженерная академия
просп. Ленина, 226, г. Запорожье, 69006, Украина.**А. В. Николенко, В. В. Кузнецов**Национальная металлургическая академия Украины
просп. Гагарина, 4, г. Днепропетровск, 49000, Украина. E-mail: wit_jane2000@mail.ru

Исследованы вопросы совершенствования и оценки параметров существующих технических средств защиты асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественной электроэнергии. Рассмотрены используемые в настоящее время активные и пассивные фильтры. Отмечены их достоинства и недостатки. Проведен анализ путей совершенствования пассивных фильтрующих устройств. Предложены новые схемные решения последних, позволяющие повысить энергоэффективность электромеханических преобразователей более чем на 10 %.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, технические средства защиты, фильтрующие устройства.

УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ НЕЯКІСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Ю. Г. КачанЗапорізька державна інженерна академія
просп. Леніна, 226, м. Запоріжжя, 69006, Україна.**А. В. Ніколенко, В. В. Кузнецов**Національна металургійна академія України
просп. Гагаріна, 4, м. Дніпропетровськ, 49000, Україна. E-mail: wit_jane2000@mail.ru

Досліджено питання вдосконалення й оцінки параметрів існуючих засобів захисту асинхронних двигунів, що працюють в умовах неякісної електроенергії. Розглянуто активні та пасивні фільтри, що використовуються в теперішній час. Надано їх переваги та недоліки. Проведено аналіз шляхів удосконалення пасивних фільтруючих пристроїв. Запропоновано нові схемні рішення останніх, що дозволяє підвищити енергоефективність електромеханічних перетворювачів більш ніж на 10 %.

Ключові слова: асинхронний двигун, технічні засоби захисту, фільтруючі пристрої.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Как известно [1–3], работа асинхронного двигателя (АД) в условиях некачественной электроэнергии приводит к негативным последствиям, а именно: возрастает температура обмоток двигателя; снижается его срок службы; уменьшаются технико-экономические показатели последнего, такие, как коэффициент мощности и коэффициент полезного действия; возрастают потери и увеличивается объем потребляемой реактивной мощности. Анализ предыдущих исследований позволяет сделать вывод о том, что работа электромеханических преобразователей в условиях некачественной электроэнергии приводит к снижению работоспособности и надежности такого класса оборудования.

Целью данной работы является усовершенствование существующих технических средств защиты АД, работающих в условиях некачественной электроэнергии, и оценка их параметров.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Исходя из вышеизложенного, очевидно, что у энергетиков предприятий возникает необходимость использования средств по уменьшению отрицательного влияния некачественной электроэнергии на энергоэффективность производства. Возможными путями решения этой проблемы являются: применение «индивидуальных» LC-фильтров [4, 5] для защиты особо ответственных электроприводов; применение «групповых» устройств для компенсации влияния некачественной электроэнергии на уровне цеха, таких, как силовые

активные выпрямители, с возможной их интеграцией в существующие преобразователи для регулируемого электропривода; подавление искажений питающего напряжения в местах их возникновения, т.е. защита сети от первопричины. Последнее определяется спецификой рассматриваемого оборудования и может включать в себя модернизацию силовой части электропривода и систем автоматического регулирования, корректный выбор параметров электропривода и т.д.

Допускается и отказ от принятия каких-либо мер в случае их экономической нецелесообразности. Действительно, каждый из указанных вариантов характеризуется конкретными стоимостью внедрения и ожидаемым экономическим эффектом.

Рассмотрим основные используемые способы повышения качества электроэнергии в цеховых сетях промышленных предприятий [4, 5]. Они классифицируются по показателям качества, которые предполагается улучшить, – несимметрии, искажениям синусоидальности и т.д. В настоящее время наиболее перспективные разработки в этой области ведутся в следующих направлениях: активная фильтрация питающего напряжения; применение пассивных резонансных фильтров.

К несомненным достоинствам активных фильтров относятся: возможность адаптации к различным формам кривых фазных напряжений; независимость их работоспособности от уровня нагрузки потребителей; компенсация как несинусоидальности, так и несимметрии фазных

напряжений; возможность использования активного фильтра для компенсации искажений питающего напряжения одновременно нескольких потребителей; коррекция коэффициента мощности потребителей. На фоне перечисленных несомненных достоинств активных фильтров, пожалуй, единственным недостатком является их высокая стоимость.

К пассивным же фильтрам относятся последовательные и параллельные LC-цепочки, настроенные, как правило, на резонанс. Кроме низкой стоимости они долговечны, фактически не требуют наладки, обслуживания и ремонта. К их недостаткам следует отнести: невозможность коррекции несимметрии питающего напряжения; неустойчивость резонансных режимов для некоторых типов фильтров из-за дрейфа параметров потребителей. Однако в настоящее время данные устройства находят широкое применение.

Как известно, эффективность использования существующих пассивных фильтров может быть повышена за счет комбинирования схем, которые сочетают различные подходы по подавлению гармоник питающего напряжения. Одной из них, применяемых в настоящее время для фильтрации выходного напряжения преобразователей частоты, является схема, показанная на рис. 1 [4].

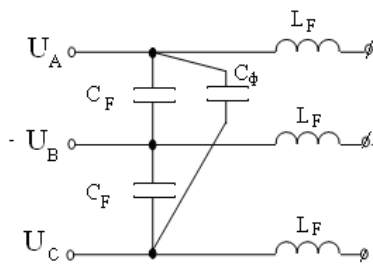


Рисунок 1 – LC-фильтр, применяемый на выходе преобразователей частоты

Емкости, входящие в состав таких фильтров, представляют собой малое сопротивление для фронтов импульсов выходных каскадов. В результате снижаются уровни перенапряжений в системе с длинным кабелем, уменьшается интенсивность электромагнитных помех, генерируемых преобразователем в эфир, и т.д. В то же время индуктивности, включенные последовательно с нагрузкой, служат ограничивающим сопротивлением для токов высокой частоты. Недостатком такой схемы, на наш взгляд, является то, что в ней не используются резонансные явления.

Наиболее распространенная в настоящее время схема комбинированного резонансного фильтра представлена на рис. 2. Для упрощения представления схемных реализаций ниже приводятся только их части, соответствующие одной фазе.

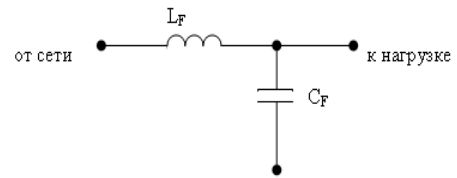


Рисунок 2 – Г-образный резонансный LC-фильтр первого порядка

В данном случае индуктивность включена последовательно с нагрузкой, ограничивая, таким образом, высшие гармоники. Учитывая, что здесь организован резонансный контур короткого замыкания для одной из высших гармоник со стороны сети, фильтр позволяет полностью «погасить» ту из них, которая соответствует резонансной частоте, и существенно ограничить другие.

В [6] представлен последовательно-параллельный фильтр второго порядка, схема которого показана на рис. 3.

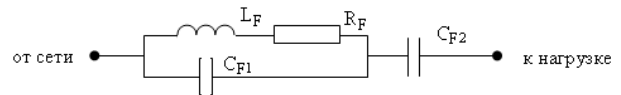


Рисунок 3 – Последовательно-параллельный фильтр второго порядка

В ней реализовано два резонансных контура. Усилия исследователей были направлены на то, чтобы найти такое сочетание параметров фильтра, при котором схема обладает максимальным сопротивлением на частоте паразитных гармоник и минимальным на основной частоте. Поиск проводится одновременно с учетом всех параметров – индуктивности L_F , емкостей C_{F1} , C_{F2} . Активное сопротивление выступает в роли подстроечного элемента. К сожалению, практическая реализация этого фильтра затруднена из-за противоречивости требований по суммарному падению напряжения на нем и параметров компонентов.

На наш взгляд, следует изменить приведенное схемное решение и пересмотреть стратегию поисков. Предложены новые схемные решения фильтрующих устройств, показанные на рис. 4.

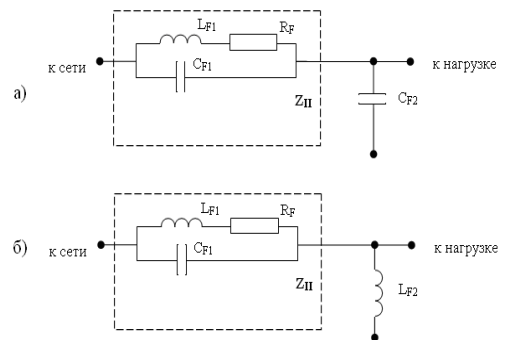


Рисунок 4 – Предлагаемые варианты реализации комбинированного Г-образного LC-фильтра второго порядка

Фільтр, реалізований таким образом, представляє собою комбінацію заградительного, включеного послідовально с навантажкою для забезпечення резонанса токів на частоті однієї з вищих гармонік, і додаткового елемента (ємкості або індуктивності) для забезпечення контура короткого замикання для другої гармоніки.

Дві можливих структури фільтрів відрізняються типом елемента, підключаемого паралельно к навантажці. Вибір той или иной структури зв'язан с вибором резонансних частот для заграждающей часті фільтра – f_1 , которая забезпечує резонанс токів для «запирания» однієї з гармонік і для цепи «фаза – нулевая точка» – f_2 , которая забезпечує резонанс напруг і, таким образом, контур короткого замикання для другої гармоніки.

Все параметри фільтра, такі, як резонансні частоти, опору гілок на різних частотах, комплексне опору на основній частоті, взаємозв'язані і визначаються комбінацією його індуктивностей і ємкостей. Будемо називати часті фільтра, послідовально з'єднану с навантажкою, «фільтром-пробкою», когда же речь пойдет о контуре протекания токів «сеть – нулевая точка», т.е. через весь фільтр, будемо говорити о опору всего комбінованного фільтра.

Таким образом, поставим задачу оптимізації, исходя из одновременного выполнения следующих условий:

- забезпечення резонанса токів на частоті нежелательной паразитной гармоніки в цепи, послідовальной с навантажкою (фільтра-пробки);
- резонанс напруг комбінованного фільтра на частоті однієї з паразитних гармонік; вибір і обґрунтування частоти резонанса напруг;
- опору фільтра-пробки на частоті 50 Гц должно быть минимальным;
- необходимо обеспечить индуктивный характер опору фільтра-пробки;
- резонанс напруг комбінованного фільтра на требуемой частоті однієї з паразитних гармонік;
- характер комбінованного фільтра на основній частоті для компенсації реактивной мощности в сети должен быть емкостным;
- техническая реализуемость параметров фільтров.

Полное опору фільтра по схеме рис. 4,а может быть рассчитано как опору послідовально з'єднанной «пробки» и конденсатора C_{F2} . Зависимость комплексного опору от частоты в данном случае имеет вид:

$$Z_2(\omega) = \frac{R_F \omega^2 L_{F1}^2}{R_F^2 + \left(\omega L_{F1} - \frac{1}{\omega C_{F1}}\right)^2} + j \left[\frac{\omega L_{F1} R_F^2 + \frac{L_{F1}}{\omega C_{F1}}}{R_F^2 + \left(\omega L_{F1} - \frac{1}{\omega C_{F1}}\right)^2} - \frac{1}{\omega C_{F2}} \right] \quad (1)$$

где ω – угловая частота питающего напряжения.

Для схемы рис. 4,б эта зависимость имеет вид:

$$Z_2(\omega) = \frac{R_F \omega^2 L_{F1}^2}{R_F^2 + \left(\omega L_{F1} - \frac{1}{\omega C_{F1}}\right)^2} + j \frac{\omega L_{F1} R_F^2 + \frac{L_{F1}}{\omega C_{F1}} + \omega L_{F2}}{R_F^2 + \left(\omega L_{F1} - \frac{1}{\omega C_{F1}}\right)^2} \quad (2)$$

Полное сопротивление комбинированного фильтра (1), (2) является функцией нескольких переменных. Интерес представляет исследование ее частотных характеристик, зависимости от частоты, на которую настроен резонанс токов фильтра-пробки, а также параметров фильтра L_{F1} , L_{F2} , C_{F1} , C_{F2} . Так как отобразить графически функции трех переменных невозможно, поэтому исследуем эту зависимость в сечениях.

На рис. 5 представлены зависимости сопротивлений, вносимых фильтром-пробкой в цепь последовательно с навантажкою, на разных частотах. При этом различным линиям соответствуют различные резонансные частоты фильтра-пробки. Их анализ свидетельствует о том, что чем выше частота, на которую настроен резонанс токов, тем меньшее сопротивление вносится в цепь питания потребителя на частоте 50 Гц. Таким образом, настройка фильтра-пробки на резонанс токов на частоте 100 Гц нерациональна, предпочтительнее использовать настройку на более высокие гармоніки – 5, 7, 11 и т.д., поскольку на основной частоті при этом сопротивление фильтров составляет единицы Ом. Вторую же гармоніку следует устранять с помощью организации контура короткого замикання.

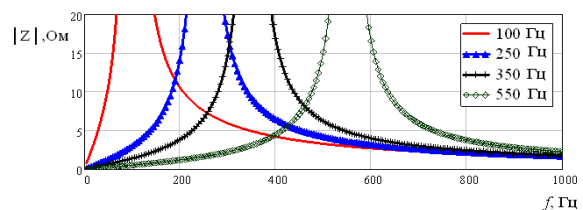


Рисунок 5 – Зависимость сопротивления фильтра-пробки на частоте 50 Гц от частоты, на которую настроен резонанс токов

Падение напряжения на фильтре-пробке определяется как результирующим сопротивлением, так и током потребителя. Поэтому чем выше мощность потребителя, тем большей должна быть резонансная частота, на которую настроен фильтр-пробка.

Выполним поиск наилучшего сочетания резонансных частот комбинированного фильтра. Зададим цикл, в ходе которого рассмотрим все возможные комбинации частот f_1 – f_2 . Для каждого сочетания рассчитаем сопротивления частей фильтра и проведем моделирование установившегося режима, в котором оценим КПД электродвигателя с учетом наличия фильтров по схеме рис. 4. Отметим, что при условии $f_1 > f_2$ необходимо выбирать структуру рис. 4,а, иначе – рис. 4,б. Это связано с условием относительного

характера результирующего сопротивления заграждающего фильтра.

На рис. 6 показана зависимость КПД от резонансных частот f_1 и f_2 , которая представляет собой трехмерную поверхность (а), и ее проекция в плоскости частот (б).

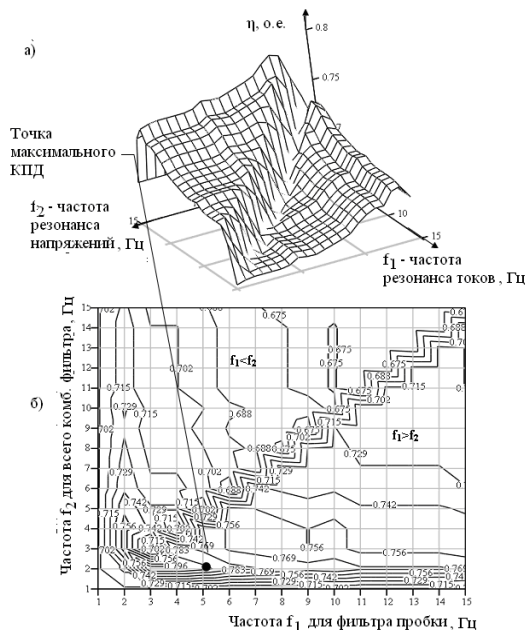


Рисунок 6 – Зависимость КПД асинхронного двигателя с комбинированным фильтром от резонансных гармоник (а) и ее проекция (б)

Анализ представленной поверхности показывает, что результирующий КПД электродвигателя получается большим в том случае, если частота резонанса токов выше, чем частота резонанса напряжений $f_1 > f_2$. Это связано с тем, что при настройке фильтра-пробки на некую частоту f_1 , для всех гармоник с частотами ниже f_1 эта часть фильтра представляет собой индуктивное сопротивление. Таким образом, происходит дополнительное снижение уровня потерь, обусловленных искажением питающего напряжения.

Таким образом, наибольший КПД системы получается, если резонанс напряжений настроен на частоту второй гармоники ($f_2=100$ Гц). Частота, на которую следует настроить резонанс токов, должна быть выбрана, исходя из специфики показателей качества в условиях конкретного цеха. Так установлено [5], что наиболее целесообразна настройка на частоту 500 Гц.

Итак, итеративным методом может быть найдено такое соотношение параметров комбинированного Г-образного фильтра, при котором в цепь питания АД вносится большое сопротивление на частоте одной из высших паразитных гармоник, и при этом одновременно организуется контур межфазного короткого замыкания для одной из гармоник, например, на частоте 100 Гц. При этом следует учитывать реальные стоимости компонентов фильтров в зависимости от желаемых настроек последнего. Для этого необходимо использовать прайсы на соответствующие комплектующие.

На рис. 7 показаны токи асинхронного двигателя мощностью 7,5 кВт, работающего в условиях некачественной электроэнергии при подключении к нему комбинированного фильтра, параметры которого рассчитаны по приведенной методике. Анализ графиков свидетельствует о том, что достигнуто значительное снижение уровня гармонических составляющих.

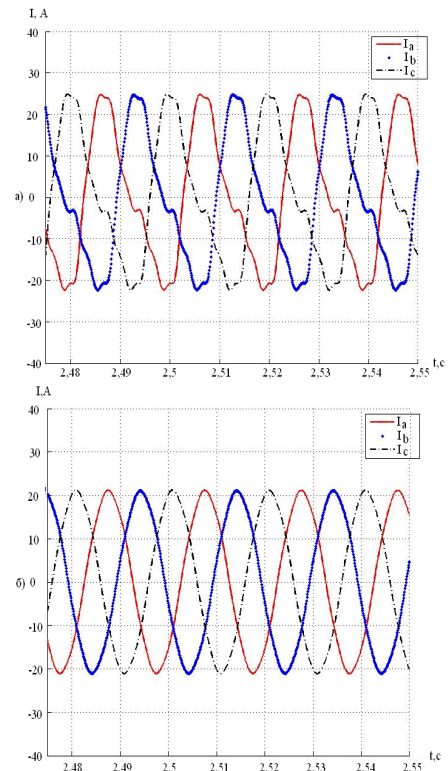


Рисунок 7 – Токи асинхронного двигателя (7,5 кВт), работающего в условиях некачественной электроэнергии: а) без фильтра; б) при подключении комбинированного фильтра

Эффективность предложенного метода была также проверена путем вычислительных исследований общепромышленного электродвигателя мощностью 7,5, работающего в условиях некачественной электроэнергии. На гистограмме (рис. 8) представлены основные энергетические показатели некоторых из них при отсутствии/наличии на входе комбинированного фильтра по схеме (рис. 4,а).

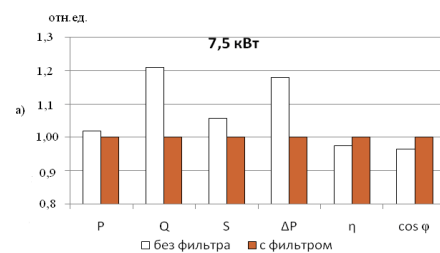


Рисунок 8 – Основные энергетические показатели двигателей различной мощности при наличии/отсутствии на входе комбинированного фильтра

ВЫВОДЫ: Анализ результатов моделирования показывает, что эффективность фильтров, т.е. относительные изменения энергетических параметров, обратно пропорциональны установленной мощности электродвигателей. Это связано с меньшей чувствительностью двигателей большой мощности к искажениям питающего напряжения. Предложенные схемные решения фильтрующих устройств позволяют повысить энергоэффективность АД более чем на 10 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 360 с.
2. Луговой А.В., Черный А.П. Вопросы практического энергосбережения промышленных предприятий // 36. наук. пр. «Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету». – Кременчук, 1998. – Вип. 1 (4). – С. 73–77.
3. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. О технико-экономической целесообразности работы

асинхронных двигателей в сетях с некачественной электроэнергией // Наук.-техн. зб. «Гірнична електромеханіка та автоматика». – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 80. – С. 58–62.

4. Moura C.C.M., Tostes M.E.L., Santos E.P. and oth. Determination of the R-L-C Parameters of a Passive Harmonic Filter Using Genetic Algorithm // IEEE Conf. on Harmonics and Quality of Power. – 2002. – Iss. 2. – PP. 495–500.

5. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. О влиянии гармонического состава питающего напряжения на энергетические показатели асинхронного двигателя // Наук.-техн. зб. «Гірнична електромеханіка та автоматика». – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 83. – С. 113–118.

6. Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К. Проблемы электромагнитной совместимости в системах электропитания с мощными преобразователями частоты // Вісник Дніпропетровського національного ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 25. – С. 11–15.

IMPROVEMENT OF FACILITIES' DEFENCE OF ASYNCHRONOUS MOTORS WORKING IN THE CONDITIONS OF THE UNQUALITY ELECTRIC POWER

U. Kachan

Zaporizhzhia State Engineering Academy
prosp. Lenina, 226, Zaporozhye, 69006, Ukraine.

A. Nikolenko, V. Kuznetsov

National Metallurgical Academy of Ukraine
prosp. Gagarina, 4, Dnipropetrovsk, 49600, Ukraine. E-mail: wit_jane2000@mail.ru

The article is devoted to improvement of facilities' defence of asynchronous motors working in the conditions of the unquality electric power. The active and passive filters used presently are considered. Their dignities and defects are marked. The analysis of ways perfection of passive filter devices is conducted. New scheme solutions of the last, allowing to promote energy efficiency of electromechanics transformers more than on 10 % are offered.

Key words: asynchronous motor, technical facilities' defence, filter equipment.

REFERENCES

1. Zhezhelenko I.V., Saenko U.L. *Indexes of quality of electric power and their control on industrial enterprises*. – M.: Energoatomizdat, 2000. – 360 p. [in Russian]

2. Lugovoy A.V., Chernyy A.P. Questions of practical energy-savings of industrial enterprises // *Collection of scientific works "Bulletin of the Kremenchuk State Polytechnic University"*. – Kremenchuk, 1998. – Iss. 1 (4). – PP. 73–77. [in Russian]

3. Kachan U.G., Nikolenko A.V., Kuznetsov V.V. About technical and economical expediency of work's asynchronous engines in networks with off-grade electric power // *Scientific and technical collection "Mountain electromechanics and automation"*. – Dnipropetrovsk, 2008. – Iss. 80. – PP. 58–62. [in Russian]

4. Moura C.C.M., Tostes M.E.L., Santos E.P. and oth. "Determination of the R-L-C Parameters of a Passive Harmonic Filter Using Genetic Algorithm" // *IEEE Conf. on Harmonics and Quality of Power*, 2002. – Iss. 2. – PP. 495–500.

5. Kachan U. G., Nikolenko A.V., Kuznetsov V.V. About influence of harmonic composition of feed-in tension on the power indexes of asynchronous engine // *Scientific and technical collection "Mountain electromechanics and automation"*. – Dnipropetrovsk, 2009. – Iss. 83. – PP. 113–118. [in Russian]

6. Saenko U.L., Baranenko T.K. Problems of electromagnetic compatibility in the systems of power supply with the powerful transformers of frequency. // *Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport*. – Dnipropetrovsk, 2008. – Iss. 25. – PP. 11–15. [in Russian]

Стаття надійшла 24.07.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Чорним О.П.