

**Выводы и направления дальнейших исследований.** На данный момент проходят испытания возможностей модуля и выявление недостатков, если таковые имеют место быть. В дальнейшем будет проходить расширение возможностей управления, путем добавления новых алгоритмов и доведения существующих с последующим увеличением быстродействия системы в целом.

#### Список литературы

1. **Виноградов А.С.** Математические основы векторного управления электроприводами переменного тока: метод. указания для самостоятельной работы студентов по курсу «Векторное управление электроприводами переменного тока» / А.Б. Виноградов, В.Л.Чистосердов; ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина». – Иваново, 2004, – 40с.
2. **Архангельский Н.Л.** Формирование алгоритмов управления в частотно-управляемом электроприводе / Н.Л.Архангельский, В.Л.Чистосердов // -М. Электротехника. – 1994. –№3. –С. 48–52.
3. **Чехет Э.М.** Непосредственные преобразователи частоты для электропривода / Э.М.Чехет, В.П.Мордач, В.Н.Соболев. –Киев: Наук.думка,1988. – 224 с.
4. **Солонина А.И.** Основы цифровой обработки сигналов: Курс лекций Изд. 2-е испр. и перераб. / **Солонина А.И., Улахович Д.А., Арбузов С.М., Соловьева Е.Б.** –СПб.: БХВ-Петербург, -2005 - 768 с.
5. STM. Datasheet на контроллер STM32F103C8T6 [Электронный ресурс] / STM // ST. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <http://www2.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/33/d4/6f/1d/df/0b/4c/6d/CD00161566.pdf/files/CD00161566.pdf/jcr:content/translations/en.CD00161566.pdf>
6. Datasheet на микросхему IR2233S [Электронный ресурс] // IRF. – 201. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2133.pdf>.
7. Datasheet на полевой транзистор IRF840 [Электронный ресурс] // FAIRCHILD. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: <http://intranet.ctism.ufsm.br/gsec/Datasheets/IRF840.pdf>.
8. **Усольцев, А. А.** Частотное управление асинхронными двигателями: -учебное пособие / А.А. Усольцев. - СПб. : СПбГУ ИТМО, 2006. - 94с.
9. **Зіманков Р.В.** / Стенд фізичного моделювання перетворювачів / **Є.С. Біднов, Р.В. Зіманков** // Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузі „Електротехніка та електромеханіка”. Збірник тез доповідей. / Дніпродзержинськ: ДДТУ. - 2015. – с. 82

Рукопись поступила в редакцию 12.04.16

УДК: 62 – 83: 629.423.1

О.Н. СИНЧУК, д-р. техн. наук, проф., И.В. КАСАТКИНА, канд. техн. наук, доц.,

Криворожский национальный университет

Л.В. СМЕНОВА, соискатель,

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДВООСНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Рассмотрены результаты моделирования переходных процессов в асинхронных двигателях тяговых двоосных электровозов на математической модели по мгновенным и средним значениям, описываемых рекуррентными соотношениями, которые позволяют рассчитать мгновенные и средние значения координат соответствующие координатам измеренным датчиками.. Применение модели предлагаемой структуры и создание системы по средним значениям текущих электротехнических параметров тяговых асинхронных двигателей позволит избавиться от помех, влияющих на точность работы системы, и повысить ее надежность в целом.

**Ключевые слова:** тяговый привод, электровоз, переходные процессы

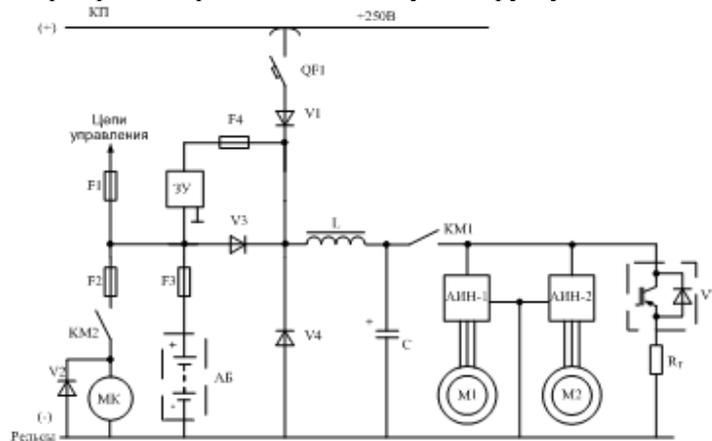
**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** В рудниках и шахтах Украины функционируют более 3-х тысяч 20-ти типов и видов двоосных электровозов, специально предназначенных для работы в подземных условиях и классифицируемых как рудничные [1].

К сожалению, все без исключения вышеотмеченные электровозы устарели морально и физически [2]. Но все же главным «устаревшим» элементом в них является электромеханическая часть - тяговый электромеханический комплекс (ТЭМК), а точнее тяговый электропривод (ТЭП), который является энергонезэффективным, ненадежным и не технологичным [3-8].

**Анализ исследований и публикаций.** В последние годы возобновились работы по созданию безопасного в эксплуатации контактно-аккумуляторного типа электровозов с энергоэффективным тяговым электроприводом: IGBT- преобразователи (автономные инверторы напряжения (АИН)) - тяговые асинхронные электрические двигатели (ТАД) [9-13]. Как правило, платформой для этих новых типов являются базы 10-ти и 14 тонных машин.

Проведенные предварительные испытания экспериментального образца такого электровоза в шахте Родина ПАО «Криворожжелезрудком» подтвердили эффективность работы этого варианта двоосного рудничного электровоза в условиях железорудных шахт [10]. Вместе с тем, было установлено и рекомендовано службами эксплуатации этих предприятий для дальнейшей доработки их конструкции в направлении совершенствования эффективной работы наличие подсистемы (системы) мониторинга состояния электрических параметров слагаемых ТЭП [14].

**Постановка задачи.** Тяговый электропривод двоосных электровозов (рис. 1) представляет собой двухмодульный комплекс: источник питания - АИН-ТАД - колесная пара. Оба эти модуля «связаны» между собой через рельс и работают на общую нагрузку.



**Рис. 1.** Упрощенная электрическая схема двоосного рудничного контактно-аккумуляторного электровоза с тяговым асинхронным двигателем где: QF1 – вводной автоматический выключатель; V1 – заградительный диод; ЗУ – зарядное устройство; АБ – аккумуляторная батарея; KM1, KM2 – линейные контакторы; L, C – соответственно дроссель и конденсатор фильтра; АИН1, АИН2 – автономные инверторы; V3 – шунтирующий диод; V4 – запирающий диод; VT, Rt – соответственно тормозной «чоппер» и тормозной резистор; M1, M2 – тяговые асинхронные двигатели; МК – электрический двигатель компрессора; V2 – шунтирующий диод электрического двигателя компрессора; F1, F2, F3, F4 – предохранители

В силу изложенного, естественно, что эффективность функционирования тягового комплекса в целом будет определяться синхронностью работы каждого из двух его слагаемых модулей, в т.ч. близостью или идентичностью его электрических параметров и, прежде всего, тяговых электрических двигателей. Разница электрических параметров тяговых модулей электровоза может быть также следствием буксования или юза одной из двух колесных пар. К сожалению, рекомендуемая разница до 2% разброса этих показателей ТЭД на практике является редким исключением. Как показали исследования [10], на практике разница электрических параметров ТЭД рудничных электровозов лежит в пределах 7 – 18%. Безусловно, такой «разброс» приводит к разности частот вращения ТЭД с вытекающими отсюда последствиями перегрузки одного и недогрузки другого двигателя по току, т.е., очевидно, что для требуемого уровня функционирования тягового комплекса двоосного электровоза, необходим постоянный мониторинг состояния текущих электрических параметров тяговых двигателей и адекватная реакция со стороны СУ ТЭП по минимизации образовавшейся разницы.

Реальным вариантом решения этой проблемы будет создание и реализация СУ соответствующего алгоритма управления. Последний, в свою очередь, не может быть реализован без предварительных исследований реальных режимов поведения тягового комплекса, т.е. моделирования этого процесса. Прежде всего, это относится к моделированию процессов в ТАД.

**Изложение материала и результаты.** В течение цикла технологического функционирования в подземных выработках железорудных шахт электровоз превращается в чрезвычайно сложный динамический объект, который с большим трудом поддается математическому описанию, то есть математическому моделированию. Между тем, задание авторов - это получение

для исследований модель, которая позволит проверить изменения процессов в ТАД с минимально возможными погрешностями.

Точность определения параметров ТАД в настоящее время достигается, как правило, применением известных методов оптимизации: множителей Лагранжа, вариационного исчисления, динамического программирования, принципа максимума, линейного программирования, симплексного метода, нелинейного программирования, геометрического программирования, метода наименьших квадратов, оптимальных наблюдателей [12]. Недостатком перечисленных методов является необходимость применения функциональных зависимостей, которые должны быть заранее известны. Выполнение большого числа математических действий при реализации перечисленных ранее методов - решении системы линейных или дифференциальных уравнений высокого порядка повышает требования к функциональным возможностям микропроцессорной вычислительной системы и усложнению программного обеспечения.

Для практической реализации системы идентификации и диагностики электрических параметров ТАД в реальном времени - слагаемых двухмодульных тяговых электромеханических систем рудничных электровозов целесообразна разработка методов с использованием нахождения минимального числа параметров по измеренным данным и оптимизацией их значений легко алгоритмически реализуемыми простыми способами, например, методом дихотомии.

С этой целью авторами разработан метод, который заключается в сравнении переходных процессов, полученных по измеренным координатам и рассчитанных на достаточно простой математической модели для условий рабочих режимов работы тягового электропривода электровоза [12].

Непрерывная математическая модель ТАД представляет собой многосвязанную систему, которая содержит внутренние нелинейные обратные связи. Поэтому при синтезе с целью упрощения непрерывной системы используется математическая модель ТАД во вращающейся системе координат.

Для синтеза автоматических регуляторов и анализа динамических режимов замкнутых ТЭМК с асинхронными двигателями, синтезированными для векторного управления, используются двухфазные математические модели, которые адекватно отображают процессы, которые протекают в реальной машине. Наиболее общей формой математического описания двухфазных моделей есть система дифференциальных уравнений и уравнений связи, которые оперируют с токами и напряжениями в координатах  $\alpha - \beta$ , легко получаемыми из фазных координат [12]

$$\begin{aligned} U_{\alpha S} &= \frac{d\psi_{\alpha S}}{dt} + R_S I_{\alpha S} + \psi_{\beta R} \omega_K \\ U_{\beta S} &= \frac{d\psi_{\beta S}}{dt} + R_S I_{\beta S} + \psi_{\alpha R} \omega_K \\ 0 &= \frac{d\psi_{\alpha R}}{dt} + R_R I_{\alpha R} + \psi_{\beta R} (\omega_K - \omega) \\ 0 &= \frac{d\psi_{\beta R}}{dt} + R_R I_{\beta R} - \psi_{\alpha R} (\omega_K - \omega) \\ M &= \frac{3}{2} L_m A (\psi_{\alpha S} \psi_{\beta R} - \psi_{\beta S} \psi_{\alpha R}) \\ M \pm M_C &= J \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $R_S, R_R$  - активные, приведенные к статору сопротивления статора и ротора;  $L_S, L_R$  - активные, приведенные к статору сопротивления статора и ротора;  $L_m$  - главная магнитная взаимная индуктивность статора и ротора;

$$A = \frac{1}{L_S L_R - L_m^2}, \quad (2)$$

где  $A$  - коэффициент асинхронного двигателя;  $J$  - момент инерции механизма.

В недвижной системе координат скорость обращения координатной системы  $\omega_K = 0$ , а выражение для напряжений примут вид

$$\begin{aligned} U_{\alpha S} &= U_m \cos \omega_S t = \sqrt{2} U_H \cos \omega_S t \\ U_{\beta S} &= -U_m \sin \omega_S t = -\sqrt{2} U_H \sin \omega_S t \end{aligned} \quad (3)$$

Токи статора  $I_{\alpha\beta S}$  и ротора  $I_{\alpha\beta R}$  с потокоцеплениями статора  $\psi_{\alpha\beta S}$  и ротора  $\psi_{\alpha\beta R}$  связаны соотношениями

$$\begin{aligned} I_{\alpha S} &= A(\psi_{\alpha S} L'_R - \psi_{\alpha R} L_m) \\ I_{\beta S} &= A(\psi_{\beta S} L'_S - \psi_{\beta R} L_m) \\ I_{\alpha R} &= A(\psi_{\alpha R} L_{SR} - \psi_{\alpha S} L_m) \\ I_{\beta R} &= A(\psi_{\beta R} L_{SR} - \psi_{\beta S} L_m) \end{aligned} \quad (4)$$

Дифференциальным уравнениям и уравнениям связей соответствует структурная схема ТЭМК в координатах  $\alpha\beta$  с ориентацией по току и потокоцеплению статора приведенная на рис. 2. Структура представляет собой нелинейную многосвязанную систему.

Для исследования замкнутых САР с приводами на базе ТАД с автономным инвертором напряжения целесообразно перейти к трем фазным значениям напряжений и токов, которые можно непосредственно измерить. Система дифференциальных уравнений примет вид

$$\begin{cases} U_a = \frac{d\psi_a}{dt} + R_S I_a \\ U_b = \frac{d\psi_b}{dt} + R_S I_b \\ U_c = \frac{d\psi_c}{dt} + R_S I_c \\ 0 = \frac{d\psi_{\alpha R}}{dt} + R_R I_{\alpha R} + \psi_{\beta R} \omega \\ 0 = \frac{d\psi_{\beta R}}{dt} + R_R I_{\beta R} - \psi_{\alpha R} \omega \\ \frac{3}{2} L_m A(\psi_{\alpha S} \psi_{\beta R} - \psi_{\beta S} \psi_{\alpha R}) \pm M_C = J \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

Уравнение связи фазных переменных с координатами  $\alpha, \beta$  и  $\omega_k=0$  имеют вид

$$\begin{aligned} \psi_{\alpha S} &= \psi_a - 0.5(\psi_b + \psi_c) \\ \psi_{\beta S} &= \frac{\sqrt{3}}{2}(\psi_b - \psi_c) \\ \psi_S &= \sqrt{\psi_{\alpha S}^2 + \psi_{\beta S}^2} \end{aligned} \quad (6)$$

Фазные токи по математической модели ТАД в координатах ABC определяются [3] следующими соотношениями

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{3}{2} I_{\alpha S} \\ I_b &= \frac{1}{\sqrt{3}} I_{\beta S} - \frac{1}{3} I_{\alpha S} \\ I_c &= -\frac{1}{\sqrt{3}} I_{\beta S} - \frac{1}{3} I_{\alpha S} \end{aligned} \quad (7)$$

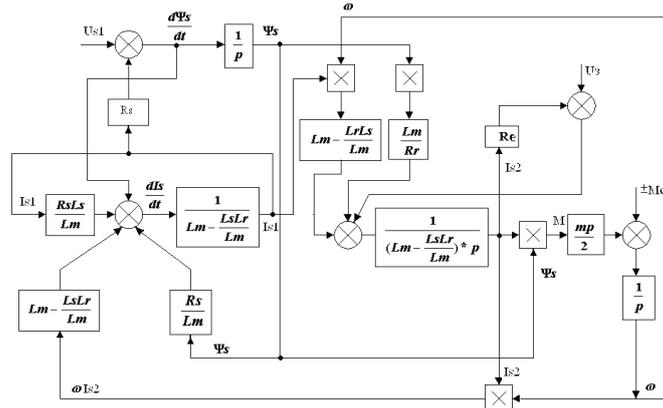


Рис. 2. Структурная схема тягового асинхронного двигателя в осях  $\alpha$ - $\beta$  с ориентацией по току статора

Переходные процессы по измеряемым координатам ТАД представлены на рис. 3-5.

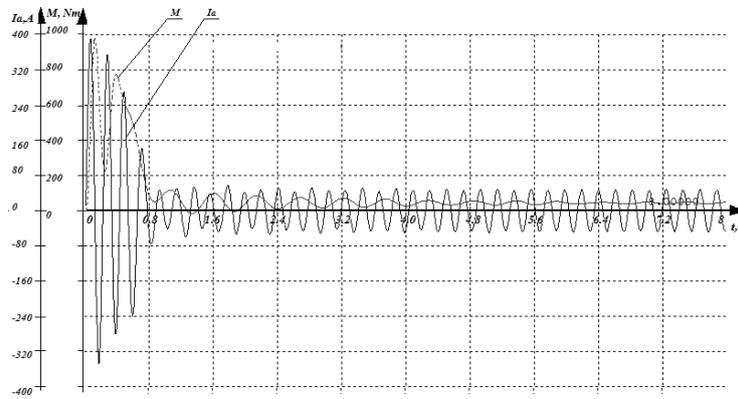


Рис. 3. Графики изменения во времени момента и тока статора тягового асинхронного двигателя при пуске

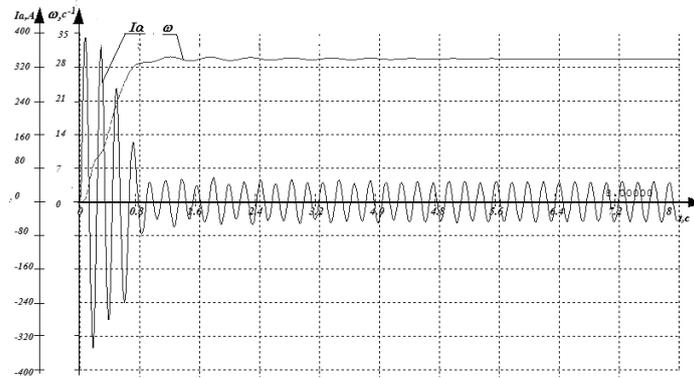


Рис. 4. Графики изменения во времени тока статора и скорости вращения тягового асинхронного двигателя при пуске

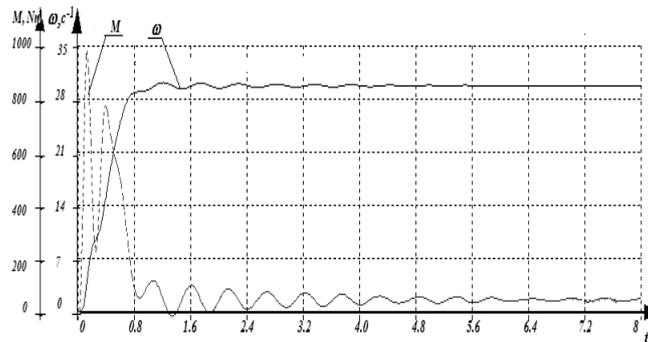


Рис. 5. Графики изменения во времени момента и тока статора тягового асинхронного двигателя при пуске

Уравнения возбуждения статора постоянным напряжением  $U_{\Pi}$

$$\begin{aligned} \frac{dI_a}{dt} &= AL_r U_{II} - I_a AL_r (R_S + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}) + \psi_\alpha AL_r \frac{R_r}{L_r} \\ \frac{d\psi_\alpha}{dt} &= 1,5R_r \frac{L_m}{L_r} I_a - \frac{R_r}{L_r} \psi_\alpha \\ \frac{d\psi_\beta}{dt} &= -0,886I_a R_r \frac{L_m}{L_r} - \frac{R_r}{L_r} \psi_\beta, \\ I_b &= -I_a \end{aligned} \quad (8)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (8) позволяет получить информацию о токе и потокосцеплении статора в переходном процессе при двухфазном возбуждении постоянным током ТАД представлен на (рис. 6).

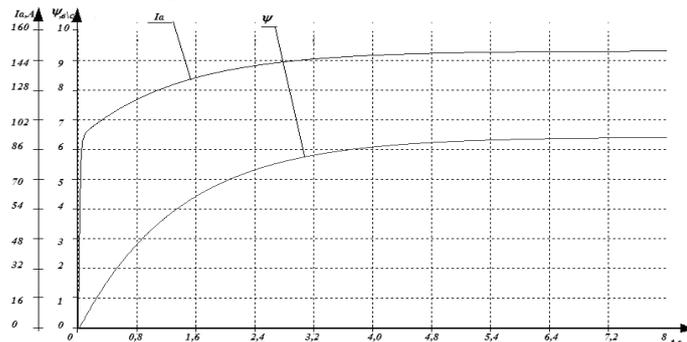


Рис. 6. Графики переходных процессов по току статора и потокосцеплению тягового асинхронного двигателя

**Выводы и направление дальнейших исследований.** По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

Разработанная математическая модель тягового асинхронного двигателя в комплексе тягового электромеханического комплекса - тягового электропривода по мгновенным и средним значениям, описываемая рекуррентными соотношениями позволяет рассчитать мгновенные и средние значения координат, соответствующие координатам, измеренным датчиками СУ ТАП.

Применение математической модели предлагаемой структуры и создание системы по средним значениям текущих электротехнических параметров тяговых асинхронных двигателей позволит избавиться от помех, влияющих на точность исследований, и повысить адекватность результата вычислений, а значит построить адекватный алгоритм работы СУ ТЭМК.

#### Список литературы

1. Дебелый В.Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый, С.А Мельников // Уголь Украины. – 2006. – №6. – С.30-31.
2. Синчук О.Н. Перспективы развития шахтных (рудничных) электровозов с энергосберегающими видами тяговых электроприводов / О.Н. Синчук, С.В. Лебедин, И.О. Синчук, О.О. Удовенко, О.В. Пасько // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СХУ ім. В. Даля. – 2006. – № 8 (102). – С. 83-92.
3. Синчук О.Н., Устенко А.В., Сменова Л.В. Тяговый электромеханический комплекс шахтного двусосного электровоза с микропроцессорной системой диагностирования. Международный информационный научно-технический журнал «Локомотив-информ» - № 07 (85), 2013.
4. Кордаков В.Н., Анискин Б.Г., Лакота О.Б., Коржев А.А. Электровозный транспорт на горных предприятиях: Проблемы и их решения, Горные машины и автоматика, вып. 5, М.:Издательство «Новые технологии»,2003,с.13-15.
5. Пасько О.В. Комбинаторика схем тягового электропривода переменного тока. //Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия «Электротехника, электроника и электропривод». Выпуск 43.-Харьков.НТУ «ХПИ». -2004.с.121-125.
6. Bertil Odeger. Computer-controlled ore transportation at the LKAB mine inRurina-Sweden Information of ASEA.1997/-212p.
7. Lane Whale. New haulage level at Kurina, Sweden, has massive capacity. – Mining Journal, Jule, 1985.- vol.№6-122p.
8. Жабоев М.Н., Озеров М.И., Косинцев В.А., Чумак В.В. / Возможности совершенствования тягового привода контактных рудничных электровозов.//Электротехника.-1993.№5.
9. Степаненко В.П., Ванцлафф В., Дайнека Р. Разработка и испытание шахтных контактно-аккумуляторных электровозов // Уголь. – 1986. – №12. – С. 32-33.

10. **Сінчук О.М.** Випробування асинхронного тягового електромеханічного комплексу рудникового контактної-аккумуляторного електровоза / Сінчук І.О., Шокарев Д.А., Скапа Є.І.// Вісник Вінницького політехнічного університету, 2011. – Вип. №6. – С. 49 – 52. ISSN 1997-9266.

11. **Синчук О.Н.** Синергетическая система асинхронного электропривода контактно-аккумуляторного двухосного электровоза [Текст] /О.Н.Синчук, Д.А.Шокарев, И.О.Синчук//Науково-технічний збірник «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». -Кременчук:КрНУ,2011.-Випуск 2/2011(14).-31-34. ISSN 2072-2052.

12. **Черная В.О.** Моделирование возможностей возникновения псевдоаварийных и аварийных ситуаций в тяговых электротехнических комплексах двухосных электровозов [Текст] / В. О. Черная, Д.А.Михайличенко //Електромеханічні і енергозберігаючі системи.– 2011. – № 4(16). – С. 134–140. – ISSN 2074–9937.

13. **Шаповал В.П., Синчук И.О., Чорная В.О.** К проблеме электромагнитной совместимости тягового электропривода:IGBT-транзисторный инвертор – асинхронный двигатель.//Електромеханічні системи, методи моделювання та автоматизації. Збірник наукових праць VI Всеукраїнської науково-технічної конференції у м. Кременчук, квітень 2008р., с.61-65.

14. **Лебедин С.В., Зайцев И.Н., Пасько О.В.** Предварительные испытания опытного образца тягового электропривода переменного тока для рудничных электровозов.//Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Наукові праці КДПУ.-Кременчук:КДПУ,2005- Вип.4/2005(33) – с.111-115.

Рукопис поступила в редакцію: 16.03.16

УДК 621.316

А.О. АНТОНЕНКО, аспирант, Криворожский национальный университет

## ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В статье рассматривается суть проблемы отклонения качества электрической энергии промышленных распределительных сетей от нормируемых значений. Целью работы является акцентирования внимания на вопросе недостаточной нормативной и технической баз, на основании которых крупные объекты промышленности проводят мероприятия по контролю и регулированию качества электрической энергии систем электроснабжения. Определено, что для снижения удельных энергозатрат и повышения энергоэффективности предприятия необходимо значительно повысить приоритетность энергоменеджмента в процессе планирования его работы, что в свою очередь, невозможно без эффективной и работоспособной системы контроля и регулирования основных параметров системы электроснабжения.

**Ключевые слова:** контроль качества электроэнергии, энергоэффективность, энергосбережение, показатели качества электроэнергии, мониторинг

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Качество электрической энергии (КЭ) должно соответствовать установленным нормативными документами требованиям, так как электроэнергия непосредственно используется при создании других видов продукции, оказывает существенное влияние на экономические показатели производства, качество выпускаемых изделий [1].

В последние годы в странах Европейского Союза ущерб потребителей электроэнергии и энергоснабжающих организаций от низкого качества электрической энергии (провалы напряжения, кратковременные и длительные перерывы электроснабжения, высшие гармоники, перенапряжения, фликер, короткие замыкания и проблемы электромагнитной совместимости) составил более 150 млрд евро [2].

**Анализ исследований и публикаций.** На данный момент в литературе обсуждаются различные способы организации систем мониторинга и контроля качества электрической энергии [7].

Были предложены методы измерений показателей качества электрической энергии [8]; способы и технологии увеличения показателей качества электроэнергии на предприятиях и распределительных сетях [9,10]. В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с необходимостью контроля и регулирования качества электроэнергии систем электроснабжения; приводятся зависимости дополнительных потерь электроэнергии в питающей сети предприятия при несоответствии нормируемых показателей качества электроэнергии (ПКЭ), а также сформулированы основные положения по повышению эффективности работы систем мониторинга, контроля и регулирования ПКЭ.

**Цель исследований.** Определить основные составляющие структуры системы контроля электрической энергии промышленных распределительных сетей с целью повышения эффективности электропотребления предприятия.

**Изложение материала и результаты.** Рассматривая вопрос контроля и мониторинга основных параметров электрических распределительных сетей промышленных предприятий с точки зрения, как