

УДК 621.316.786

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.29929

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИНХРОНИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

О. Г. ГривДоктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой***Д. А. Гапон**

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: dima12345ml@mail.ru

Р. В. Жданов

Начальник**

Т. С. Иерусалимова

Ассистент*

E-mail: lerusalimovat@mail.ru

*Кафедра автоматизации энергосистем

Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

**Красноградский РЭС АК «Харьковоблэнерго»

ул. Полтавская, 71, г. Красноград,

Харьковская область, Украина, 63304

У статті розглянуто питання недоліків існуючих нормативних документів, що регламентують побудову вимірювальних засобів для оцінки відповідності якості електричної енергії по такому параметру, як рівні вищих гармонійних складових. Наведено експериментальні дані та їх аналіз, що говорять про неможливість виконання оцінки за класом А з буквального виконанням стандартів

Ключові слова: вищі гармоніки, синхронізація, якість, електрична енергія, частота, енергосистема, споживач

В статье рассмотрен вопрос недостатков существующих нормативных документов, регламентирующих построение измерительных средств для оценки соответствия качества электрической энергии по такому параметру, как уровни высших гармонических составляющих. Приведены экспериментальные данные и их анализ, говорящие о невозможности выполнения оценки по классу А с буквального выполнением стандартов

Ключевые слова: высшие гармоники, синхронизация, качество, электрическая энергия, частота, энергосистема, потребитель

1. Введение

Обеспечение необходимых параметров качества электрической энергии является обязательным условием нормальной работы значительного числа электроприемников и системы электроснабжения в целом. Ключевым элементом, позволяющим эффективно регулировать отношения между потребителем и поставщиком электрической энергии на законодательном уровне, является нормативная база. Наиболее совершенными на сегодняшний день документами, регламентирующими параметры электрической энергии, границы допустимых значений и методы их измерения являются группы стандартов IEC 50160 и IEC 61000. Однако, как будет показано далее, эти стандарты также не лишены недостатков [1].

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Одними из наиболее важных показателей качества являются уровни высших гармоник в сигналах токов

и напряжений. В качестве основного метода измерения уровней гармонических составляющих сигналов токов и напряжений должен применяться метод на базе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) (МЭК 61000-4-7). Однако, как указано в [2, 3], данное преобразование крайне чувствительно к некратности интервала наблюдения и измеряемых составляющих. Для устранения этого недостатка в средствах измерения предусмотрена синхронизация частоты квантования по отношению к частоте основной гармоники измеряемого сигнала, а также объединение гармонических групп.

Следует рассмотреть измерительную процедуру более подробно. Согласно ГОСТ 30804.4.30-2013 (МЭК 61000-4-30) определено три класса средств измерения показателей качества электрической энергии. Однако, для целей оценки соответствия показателей качества нормам стандартов, предусматривающих возможность разрешения спорных вопросов может применяться только класс А, являющийся наиболее жестким. Поэтому дальнейшая процедура приводится именно для этого класса.

В качестве основного интервала времени при измерениях показателей КЭ, характеризующихся сред-

неквадратическим значением (относящихся к напряжению, гармоникам и интергармоникам, несимметрии напряжений, установившемуся отклонению напряжения в системах электроснабжения 50 Гц), должен быть принят интервал длительностью 10 периодов для систем электроснабжения частотой 50 Гц.

Измерения на основных интервалах 10 периодов должны синхронизироваться с текущим временем при каждой 10-минутной отметке текущего времени внутренних часов средства измерения.

Результаты измерений на основных интервалах времени затем объединяют для получения значений показателей КЭ для трех увеличенных интервалов времени (далее – объединенные интервалы):

- 3 секунды (150 периодов для систем электроснабжения частотой 50 Гц);
- 10 минут;
- 2 часа.

Значение величины на объединенном интервале 3 секунды (150 периодов) получают объединением пятнадцати результатов измерений на основных интервалах времени (10 периодов). Пропуски между интервалами времени 10 периодов не допускаются. Объединенные интервалы времени 3 секунды (150 периодов) синхронизируют с текущим временем при каждой 10 минутной отметке текущего времени как показано на рис. 1. В момент 10 минутной отметки текущего времени начинается новый интервал 150 периодов и вместе с тем завершается предыдущий интервал 150 периодов. В результате возникает перекрытие между двумя интервалами 150 периодов как показано на рис. 1.

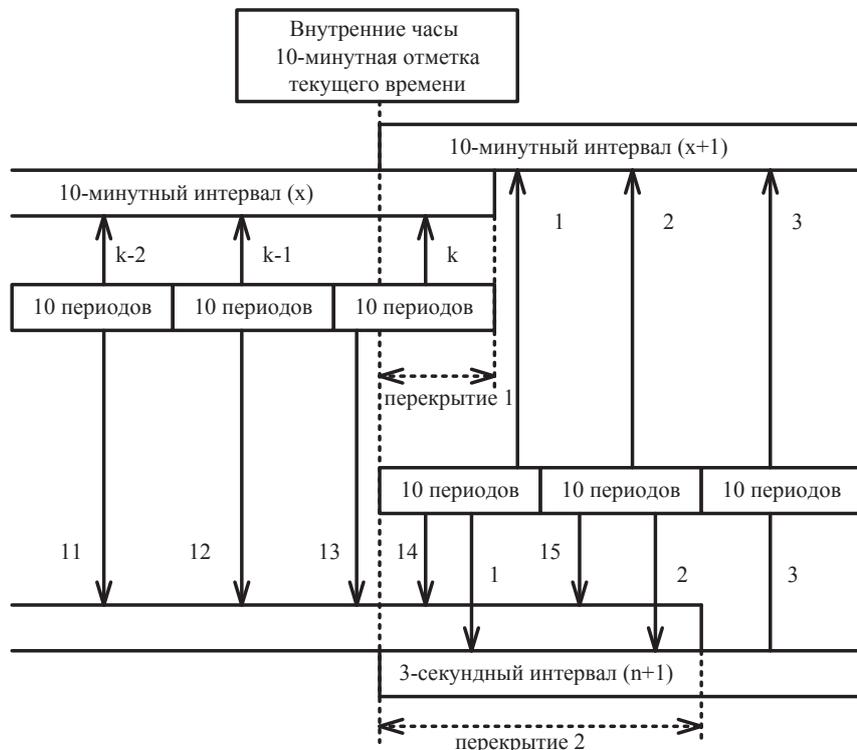


Рис. 1. Синхронизация интервалов с 10-минутной отметкой текущего времени

За значение величины на объединенном интервале времени принимают значение, равное корню квадрат-

ному из среднеарифметического значения квадратов входных величин.

Из всего вышесказанного особое внимание хотелось бы обратить на то, что для получения величины на объединенном интервале необходимо использовать все полученные значения на интервалах 10 периодов без пропусков и без исключений.

Применение измерительного окна Хеннинга допускается только при потере синхронизации. Данные, полученные при потере синхронизации, должны маркироваться. Эти данные не подлежат применению для целей оценки соответствия, но могут быть применены для других целей.

Это означает, что в случае потери синхронизации на единственном интервале 10 периодов получить объединенные значения на интервалах 3 секунды, 10 минут и 2 часа, пригодные для оценки соответствия качества уже невозможно.

В том же стандарте указано, что длительность временного интервала измерения должна быть 10 периодов основной частоты (для систем электроснабжения 50 Гц, т. е. $T_N = (10 \text{ или } 12) \cdot T_1 \approx 200 \text{ мс}$ при прямоугольном взвешивании; N – число периодов основной частоты системы электроснабжения, соответствующее длительности временного интервала измерения (измерительного окна), T_N – длительность временного интервала измерения, включающего в себя N периодов основной частоты, T_1 – период основной частоты системы электроснабжения).

Временной измерительный интервал должен быть синхронизирован с каждой группой из 10 периодов основной частоты (для систем электроснабжения 50 Гц).

Интервал времени между началом первого отсчета дискретизированного сигнала и началом $(M+1)$ отсчета дискретизированного сигнала (M – целое число, число отсчетов в измерительном окне) должен быть равен длительности установленного числа периодов основной частоты при максимальном отклонении не более 0,03 %.

В [5, 6] отмечено, что описанный алгоритм создает массу трудностей для его технической реализации. Кроме того, переменная частота дискретизации затрудняет постобработку полученных данных [7].

Фактически, средство измерения должно выполнять предсказание значения длительности 10 периодов на последующие ≈ 200 мс с ошибкой не более 60 мкс. Однако каким именно образом предполагается осуществлять подобное предсказание в стандарте не указано. Более того, не раскрыта также и методика определения факта рассинхронизации. Логично было бы предположить, что предсказание длительности 10 периодов должно выполняться на основе

измеренной частоты. Однако в ГОСТ 30804.4.30-2013

(МЭК 61000-4-30) указано, что значение частоты должно быть измерено на каждом интервале времени 10 секунд. Поскольку частота переменного тока может не равняться точно 50 Гц в пределах интервала 10 секунд, число периодов может быть не целым числом. Измеренная основная частота равна отношению числа целых периодов, подсчитанных за 10-секундный интервал времени, к общей продолжительности целых периодов. Перед каждой оценкой частоты гармоники и интергармоники должны быть ослаблены с тем, чтобы минимизировать влияние многократных пересечений нуля. Интервалы времени 10 секунд не должны перекрываться. Отдельные периоды, которые перекрывают 10-секундный интервал текущего времени, не учитываются. Каждый 10-секундный интервал должен начинаться на абсолютной 10-секундной отметке текущего времени. Неопределенность измерений в области значений влияющих величин не должна превышать $\pm 0,01$ Гц при диапазонах измерений 42,5–57,5 Гц.

Такой алгоритм измерения частоты не позволяет решить проблему синхронизации, а также определения факта рассинхронизации. Таким образом, для реализации средства измерения соответствующего классу А необходимо решить две задачи:

- 1) выполнить предсказание значения частоты на последующие ≈ 200 мс;
- 2) оценить точность выполненного предсказания.

Однако, с учетом возможных искажений и шумов в сигнале напряжения, попытка получения подобной информации с необходимой точностью представляет собой весьма трудноразрешимую, а то и вовсе невыполнимую задачу.

3. Цель и задачи исследования

Целью данного исследования является оценка выполнимости и эффективности описанных в стандартах методов и требований по классу А относительно измерения уровней гармонических составляющих сигналов токов и напряжений, а также разработка предложений относительно возможных направлений усовершенствования существующих стандартов.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

- разработать устройство, позволяющее измерять частоту напряжения основной гармоники напряжения электрической сети в соответствии с требованиями стандартов;
- провести замеры в реальной энергосистеме в достаточном объеме для получения оценки эффективности методов и средств измерений;
- оценка возможности реализации синхронизации длительности интервала наблюдения с длительностью 10 периодов напряжения с выполнением заданных в стандартах ограничений.

4. Исследование возможности выполнения синхронизации: материалы и методы

Для того чтобы оценить насколько вообще поставленная задача выполнима, было реализовано устройство, выполняющее измерение частоты на интервалах 10 периодов основной гармоники.

В качестве метода измерения частоты был выбран метод на базе метода наименьших квадратов, разработанный на кафедре автоматизации энергосистем Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Эффективность метода и устройства были подтверждены экспериментально. На рис. 2 показан фрагмент результатов измерения частоты на линии 110 кВ ПС «Залютино», которая удалена на 2 км от ТЭЦ-5, что позволяет практически полностью исключить влияние искажений вносимых токами нагрузки на результаты измерений.

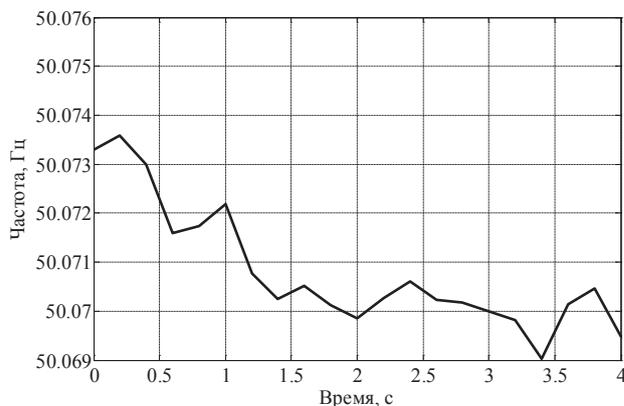


Рис. 2. Фрагмент результатов измерения частоты

С помощью устройства проведены замеры частоты основной гармоники сигнала напряжения в электрической сети потребителя. В качестве объекта наблюдения была выбрана электрическая сеть Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Данный объект находится в городской застройке и не связан с крупными промышленными потребителями, способными внести значительные искажения в сигнал напряжения. То есть можно говорить о том, что измерения проводились в относительно благоприятных условиях. Фрагмент результатов приведен на рис. 3.

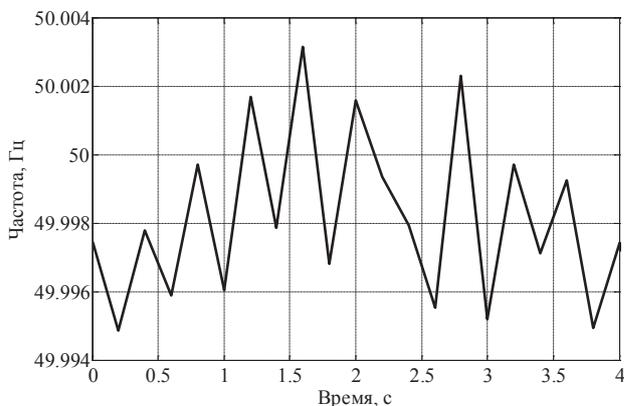


Рис. 3. Фрагмент результатов измерения частоты

Следует отметить, что видимая колебательность обусловлена не погрешностями метода или устройства, а характером напряжения в электрической сети. В этом можно убедиться, сопоставив полученные результаты с тем же фрагментом, но обработанным в режиме сколь-

зящего окна, приведенном на рис. 4, а также с результатами приведенными выше.

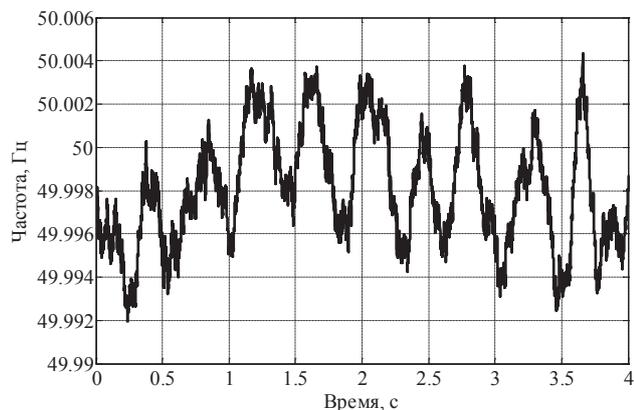


Рис. 4. Фрагмент измерения частоты скользящим окном

Полученные результаты говорят о том, что шумовая составляющая определяющаяся свойствами метода и погрешностями аналого-цифрового преобразования примерно на порядок меньше, чем полученная амплитуда колебаний частоты. Согласно [4], имеется прямая зависимость между погрешностью измерения частоты и уровнем помехи во входном сигнале. Так как сопротивление системы электроснабжения не равно нулю, то токи нагрузки влияют на значение напряжения в точке измерения, а, следовательно, и на результат измерения. И чем более несинусоидальными и нестационарными являются токи нагрузки – тем большей будет погрешность измерения частоты. Снижение же погрешности возможно только при увеличении длительности интервала наблюдения. Однако в данном случае эта длительность ограничена 10 периодами основной гармоники. Таким образом, возможности для снижения уровня псевдослучайной составляющей измеренной частоты отсутствуют.

5. Результаты исследований изменения частоты в энергосистеме

Измерения проводились в течение примерно 72 часов. Длительность одного интервала равна 200 мсек. Интервалы следуют последовательно без пропусков и не пересекаются между собой. Таким образом, было выполнено 1296000 последовательных измерений значения частоты. По полученным данным были рассчитаны разности между последовательными значениями частоты. Фрагмент этой последовательности, позволяющий оценить ее характер, приведен на рис. 5. Из рисунка видно, что в подавляющем большинстве случаев псевдослучайная составляющая разности двух последовательно измеренных частоты не превышает 0,003 Гц. С одной стороны это свидетельствует о достаточно низкой погрешности измерений, а с другой стороны подтверждает, что частота в энергосистеме стабильна среднеквадратическая разность двух соседних значений частоты в течение всего эксперимента составила 0,0022 Гц.

Однако если рассмотреть более длительные периоды времени, то можно обнаружить, что имеют место

случаи, когда модуль разности двух последовательно измеренных частот превышает указанные выше 0,015 Гц. Так на рис. 6 приведена последовательность измерений, по результатам которых были выделены случаи превышения указанного порога, что, с точки зрения описанного выше стандарта с высокой вероятностью квалифицировалось бы как потеря синхронизации. Из рис. 6 видно, что в течение первого часа было 24 таких события.

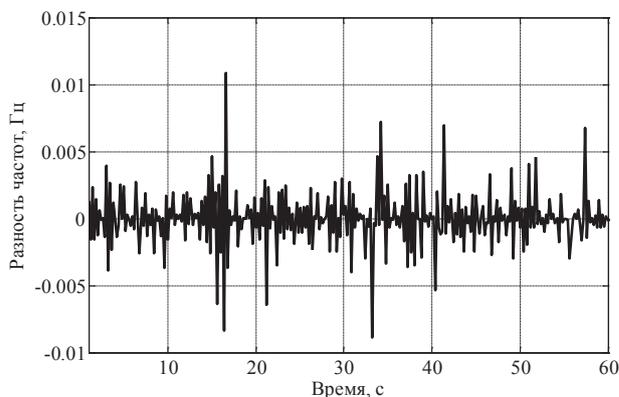


Рис. 5. Фрагмент последовательности разностей частот

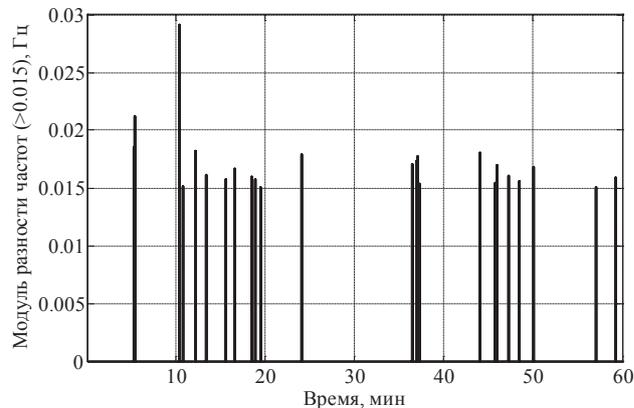


Рис. 6. События отклонения частоты за период 1 час

На рис. 7 приведены результаты наблюдений в течение 8 часов, а на рис. 8 – в течение всего периода 72 часа.

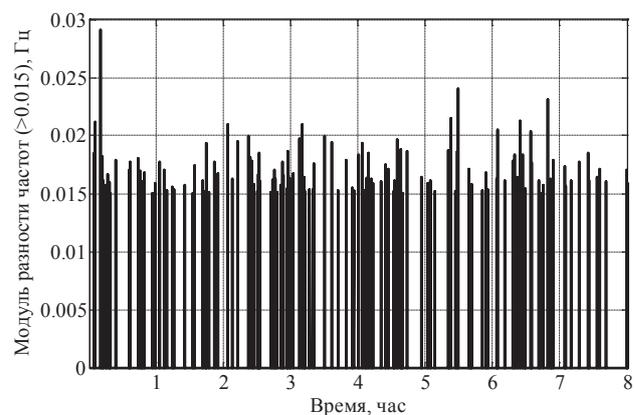


Рис. 7. События отклонения частоты за период 8 часов

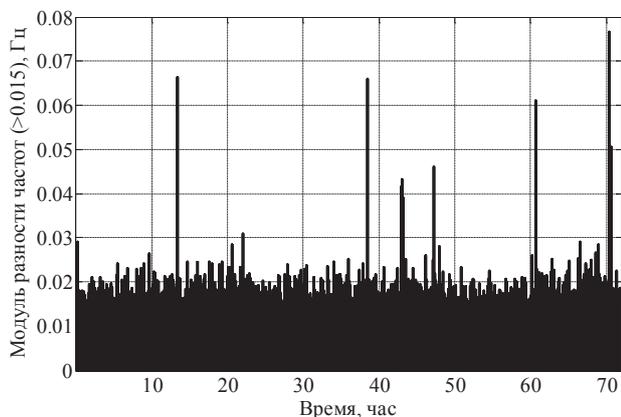


Рис. 8. События отклонения частоты за период 72 часа

Таким образом, в 1933 случаях из 1296000 измерений было обнаружено превышение разности последовательных частот над заданным порогом в 0,015 Гц. Максимальная продолжительность наблюдения, в течение которого не было зарегистрировано превышений, составила 7004 измерения.

6. Обсуждение результатов экспериментальных наблюдений изменения частоты в энергосистеме

Примерно каждое 670 измерение возникает событие, которое можно интерпретировать как сбой синхронизации. Максимальная продолжительность времени без сбоев составляет чуть больше 23 минут. Это означает, что за время наблюдения не было получено ни одного объединенного интервала 2 часа без сбоев синхронизации, не говоря уже о сутках или более. Причины таких результатов вполне объяснимы. Так, например в [8] указано, что любое локальное возмущение в энергосистеме, приводит к возникновению электромагнитного переходного процесса, который, в свою очередь, оказывает негативное влияние на величину погрешности измерения таких данных как частота. Более того, в ГОСТ 30804.4.30-2013 (МЭК 61000-4-30) описана концепция «маркирования» данных, исключающая многократное протоколирование одного события в разных категориях, в случае обнаружения какого-либо возмущения. Указано, что во время провала напряжения, перенапряжения или прерывания напряжения, алгоритм, применяемый при измерении других показателей качества электроэнергии, в частности частоты, может привести к недостоверному результату. Данное замечание справедливо, однако следует отметить, что к недостоверному результату также могут приводить события, во время которых ни один

из показателей качества не выходит за допустимые нормы. В развитой энергосистеме, такой как энергосистема Украины, события, приводящие к появлению заметных электромагнитных переходных процессов, происходят регулярно. В каждой отдельной точке энергосистемы их частота может достигать нескольких событий в час, что и было подтверждено проведенным экспериментом. Особое внимание хотелось бы обратить на сравнительно редкие события, во время которых наблюдаются «скачки» частоты более чем на 0,05 Гц. Грубая оценка показывает, что изменение частоты на 0,05 Гц в течение 0,2 с подразумевает скорость изменения частоты 0,25 Гц/с, что соответствует небалансу активной мощности около 6 % (считая, что скорость изменения частоты равна 0,4 Гц/с на каждые 10 % небаланса). Вполне очевидно, что в такой крупной энергосистеме как украинская, такой небаланс может возникнуть только в случае крупной аварии, и бывает значительно реже, чем раз в сутки.

7. Выводы

По полученным результатам можно сделать следующие выводы о том, что частота в энергосистеме не является статической величиной, а подвержена постоянным колебаниям. Эти колебания обусловлены не только характером движения роторов генераторов, но и взаимодействием электроприемников потребителя с энергетической системой. Величина этих колебаний зависит от характера нагрузки и может достигать нескольких сотых долей Гц.

Наличие указанных колебаний не позволяет обеспечить надежную синхронизацию частоты выборки аналого-цифрового преобразования с длительностью 10 периодов основной гармоники напряжения с точностью не хуже 0,03 %. В рассмотренном случае примерно каждые 2 минуты наблюдались события, характеризующиеся как сбой синхронизации.

Таким образом, выполнение оценки соответствия качества электрической энергии в полном соответствии с существующими стандартами возможно далеко не всегда. Причем вероятность получения достоверных данных тем ниже, чем ниже качество электрической энергии, а следовательно выше необходимость их получения. Для исключения рассмотренных противоречий целесообразна доработка нормативов, в частности положений касающихся нарушений синхронизации [9]. В качестве альтернативы также следует рассмотреть варианты включения в нормативную базу более совершенных алгоритмов измерения уровня высших гармонических составляющих, предложенных, например в [10, 11].

Литература

1. Гриб, О. Г. Контроль потребления электроэнергии с учетом ее качества [Текст] / О. Г. Гриб, В. И. Васильченко, Г. А. Сендерович, П. Г. Щербакова и др.; под ред. О. Г. Гриба. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – 444 с.
2. Jayasree, D. D. Classification of Power Quality Disturbance Signals Using FFT, STFT, Wavelet Transforms and Neural Networks – A Comparative Analysis [Text] : inter. conf. / D. D. Jayasree // International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA), 2007. – P. 335–340, doi: 10.1109/iccima.2007.279.
3. Muzi, F. A real-time harmonic monitoring aimed at improving smart grid power quality [Text] / F. Muzi, M. Barbat // 2011 IEEE International Conference on Smart Measurements of Future Grids (SMFG) Proceedings, 2011. – P. 95–100. doi: 10.1109/smfg.2011.6125768.

4. Гапон, Д. А. Завадостійкий метод вимірювання промислової частоти і швидкості її зміни [Текст] : матер. XX міжн. наук.-прак. конф. / Д. А. Гапон // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Ч. II. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – С. 206.
5. Folea, S. Power quality measurement system using FPGAs [Text] / S. Folea, G. Mois, L. Miclea // 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2012. – P. 1280–1285. doi: 10.1109/optim.2012.6231855.
6. Chanxia, Zhu. Design and realization of regional power quality monitoring system [Text] / Zhu Chanxia, Hu Minqiang, Wu Zaijun, Dou Xiaobo, Zhao Shanglin // 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. – P. 2023–2027. doi: 10.1109/drpt.2008.4523740.
7. Li, P. Power Quality Monitoring of Power System Based on Spectrum Analysis [Text] / P. Li, L. Zhao, H. Bai, Y. Zhang // 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, 2010. – P. 1–4. doi: 10.1109/iceee.2010.5661359.
8. Siahkali, H. Power quality indexes for continue and discrete disturbances in a distribution area [Text] / H. Siahkali // 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, 2008. – P. 678–683. doi: 10.1109/pecon.2008.4762561.
9. Rendroyoko, I. Development of power quality control procedures and standards to control the connection of non-linear loads in electric power systems [Text] / I. Rendroyoko, M. Rusli // 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), 2013. – P. 1–6. doi: 10.1049/cp.2013.0621.
10. Abdullah, A. R. A new vector draft method for harmonic source detection at point of common coupling [Text] / A. R. Abdullah, G. Z. Peng, S. A. Ghani, M. H. Jopri // 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2014. – P. 110–114. doi: 10.1109/peoco.2014.6814409.
11. Chung, I.-Y. Development of power quality diagnosis system for power quality improvement [Text] / I.-Y. Chung, D.-J. Won, J.-M. Kim, S.-J. Ahn, S.-I. Moon, J.-C. Seo, J.-W. // 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491). doi: 10.1109/pes.2003.1270509.

В роботі виконано експериментальне дослідження параметрів енергії гальмування електропоїздів в умовах Дніпропетровського метрополітену (Україна). Встановлено, що в режимі реостатного гальмування утилізується 15...50 % енергії, витраченої на тягу поїздів. Запропоновано та оцінено якісні показники ефективності енергії рекуперації, що необхідно враховувати при виборі раціонального заходу з підвищення ефективності використання енергії гальмування електропоїздів

Ключові слова: метрополітен, електроспоживання, електричне гальмування, рекуперація, електроенергія, надлишкова, показники ефективності, енергозбереження

В работе выполнено экспериментальное исследование параметров энергии торможения электропоездов в условиях Днепропетровского метрополитена (Украина). Установлено, что в режиме реостатного торможения утилизируется 15...50 % энергии, затраченной на тягу поездов. Предложены и оценены качественные показатели эффективности рекуперации энергии, что необходимо учитывать при выборе рационального мероприятия по повышению эффективности использования энергии торможения электропоездов

Ключевые слова: метрополитен, электропотребление, электрическое торможение, рекуперация, электроэнергия, избыточная, показатели эффективности, энергосбережение

УДК 629.423.1

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.30483

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В УМОВАХ МЕТРОПОЛІТЕНУ

О. І. Саблін

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра електропостачання залізниць
Дніпропетровський національний
університет залізничного транспорту
ім. ак. В. Лазаряна
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ,
Україна, 49010
E-mail: olegsss@i.ua

1. Вступ

В метрополітенах України середня відстань між станціями становить близько 0,9...1,5 км, тому режими руху електропоїздів пов'язані з періодичними прискореннями і гальмуваннями між зупинками. Данні режими руху, навіть при середній швидкості початку

гальмування ~ 40 км/год є сприятливими для рекуперації електроенергії, що дозволяє суттєво зменшити енергоємність метрополітенів. При відсутності на рухомому складі системи рекуперативного гальмування 30...45 % витрат енергії на тягу втрачається шляхом утилізації частини кінетичної і потенціальної енергії поїзда перед зупинкою в гальмівних пристроях [1].