

УДК 621.316.925

© Дьяченко М.Д.<sup>1</sup>, Кодулев С.В.<sup>2</sup>**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА РАБОТЫ  
МАСЛОНАСОСОВ СИЛОВЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ**

*В статье рассмотрены основные предпосылки создания автоматизированной системы мониторинга маслонасосов высоковольтных трансформаторов, приведены основные аппаратные и алгоритмические решения.*

**Ключевые слова:** виброконтроль, маслонасос, силовой трансформатор, мониторинг.

*Дьяченко М.Д., Кодулев С.В. Программно-аппаратный комплекс моніторингу роботи маслонасосів силових високовольтних трансформаторів. У статті розглянуті основні передумови створення автоматизованої системи моніторингу маслонасосів високовольтних трансформаторів, наведені основні апаратні і алгоритмічні рішення.*

**Ключові слова:** виброконтроль, маслонасос, силовий трансформатор, моніторинг.

*M.D. Dyachenko, S.V. Kodulev. Hardware and software system for monitoring oil pump operation in power high-voltage transformers. The article considers the basic prerequisites for the creation of an automated monitoring system for oil pumps of high-voltage transformers. This is due to the fact that the long operation of oil pumps results in deterioration and destruction of bearings, rubbing of the rotor, breakage and damage to the impeller, leakage, etc., which inevitably causes a significant decrease in the insulating properties of the transformer oil and leads to expenditures for its further recovery. False triggerings of gas protection sometimes occur. Continuous operation of the electric motor also requires additional equipment to protect the motor itself from various emergency situations, such as a short in the stator winding, a housing breakdown, an incomplete phase mode, etc. The use of stationary systems provides: diagnosing defects at an early stage of their development, increasing the reliability and longevity of the equipment components, increasing the overhaul period, decreasing the number of emergency stops, and adjusting the schedule of preventative maintenance. The basic principles of identification of the damaged part of the oil pump are given, the hardware and algorithmic solutions are considered in the work. The full-scale tests of the model sample on the power transformer of the high-voltage substation confirmed the assumption of the possibility of detecting the damaged unit separating it from the rest connected in one mechanical structure. A detailed analysis of the operation of each of the units is carried out by means of the general substation switchboard and displayed as graphs, diagrams and text messages. When the limit values of vibration are reached, faults in the operation of the unit are detected, the overlimit current values, a warning alarm is activated, and the command to disconnect the damaged system unit is issued. The optimal solution for the organization of the information collection system using the principle of sensor networks, but combined via Wi-Fi technology, is given.*

**Keywords:** vibration control, oil pump, power transformer, monitoring.

**Постановка проблемы.** Задача оценки технического состояния электрооборудования высоковольтных подстанций в настоящее время приобретает особое значение. Обусловлено это, прежде всего, высоким уровнем износа оборудования, отсутствием простых и однозначных критериев определения окончания срока службы электрооборудования, а также тенденциями роста нагрузок электропотребления.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

<sup>2</sup> ведущий инженер Управления автоматизации, ЧАО «ММК им. Ильича», г. Мариуполь

В этом аспекте особую роль играет оборудование высоковольтных силовых трансформаторов и автотрансформаторов, в частности, маслonaсосов. Каждый маслonaсос представляет собой асинхронный электродвигатель мощностью до 15 кВт со скоростью вращения до 3000 об/мин. Сам двигатель вместе с крыльчаткой заключены в общий герметичный корпус. Длительная работа маслonaсосов приводит к износу и разрушению подшипников, затиранию ротора, поломке и повреждению крыльчатки, появлению протечек и т. д., что в результате неминуемо вызывает значительное снижение изоляционных свойств трансформаторного масла и приводит к затратам на дальнейшее его восстановление. Возможно даже ложное срабатывание газовой защиты. Кроме того, длительная работа электродвигателя требует еще оборудование для защиты самого электродвигателя от различных аварийных ситуаций, таких как замыкание в обмотке статора, пробой на корпус, неполнофазный режим и т. д.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Тема мониторинга состояния высоковольтного оборудования в последние годы обрела широкое распространение. Особое место в этом уделяется методам тепловизионного контроля и вибродиагностике. Множество публикаций в области повышения надежности электрооборудования доказывает целесообразность исследования в данном направлении.

Один из известных методов контроля состояния электродвигателей и центробежных насосов – метод вибрационной диагностики. Однако традиционные методы вибрационной диагностики требуют применения дорогостоящего оборудования и для контроля состояния маслonaсосов их нельзя считать оптимальными ввиду чрезвычайной избыточности и сложности. Для каждого из объектов контроля требуются значительные усилия для выявления причинно-следственной связи изменения вибрационной картины от появления какого-либо дефекта.

В конструкции мощных силовых трансформаторов и автотрансформаторов используется принцип группового объединения нескольких (шесть и более) маслonaсосов на одном трубопроводе. Это, в случае проявления дефекта на одном из них, неминуемо приводит к изменению вибрационной картины не только на маслonaсосе с проявившимся дефектом, но и на остальных маслonaсосах, что к тому же может вызвать появление механических резонансных явлений и привести к ложной идентификации кратных дефектов.

**Цель статьи** – показать необходимость и возможность создания автоматизированной системы автоматического мониторинга и защиты электродвигателей маслonaсосов силовых трансформаторов и автотрансформаторов высоковольтных подстанций с использованием метода «вибрационных фотографий».

**Изложение основного материала.** Стационарные системы виброконтроля и вибродиагностики позволяют однозначно определять текущее состояние оборудования, планировать текущие ремонты, отслеживать любые тенденции в работе оборудования. Применение стационарных систем обеспечивает: диагностирование дефектов на ранней стадии их развития, повышение надежности и долговечности составных частей оборудования, увеличение межремонтного периода оборудования, уменьшение числа аварийных остановок, корректировку графиков профилактических ремонтов. Задачей системы вибрационного мониторинга является обнаружение изменений состояния оборудования задолго до наступления аварийной ситуации и своевременная выдача предупреждения обслуживающему персоналу. При этом необходимо учитывать, что каждый механизм уникален и требует индивидуальной проработки возможных мест установки для каждого объекта контроля. Вибрационный мониторинг маслonaсосов силовых трансформаторов и автотрансформаторов в этом плане представляет достаточно сложную задачу, так как присутствует ряд факторов, значительно затрудняющий этот процесс.

Как правило, вибрационное обследование маслonaсосов проводится на отключенном трансформаторе путем поочередного включения и произведения измерений на каждом из маслonaсосов. Замеры вибрации на маслonaсосах проводятся переносным виброанализатором, регистрирующим вибросигнал в диапазоне от 10 до 1000 Гц (для насосов с числом оборотов ротора равным 3000 об/мин) или от 10 до 400 Гц (для насосов с числом оборотов ротора равным или меньшим 1500 об/мин). Измерения проводятся на каждом подшипнике двигателя маслonaсоса в трех плоскостях. При последующих проверках делают вывод о появлении какого-либо дефекта [1].

Как правило, для диагностирования асинхронных электродвигателей используются спектры виброускорения [2]. В измерении общего уровня колебаний максимальный вклад дают не-

сколько основных составляющих – их принято называть доминирующими составляющими, например, составляющая на частоте вращения ротора, как правило, имеет значительную величину. Появление какого-либо дефекта достаточно трудно локализовать, так как доминирующая составляющая маскирует проявления развивающегося дефекта.

Простейшим из известных методов вибродиагностики является измерения общего уровня вибрации. В этом случае в широком частотном диапазоне измеряются среднеквадратичные или пиковые значения виброускорения механических колебаний [2].

Измерение общего уровня является грубой оценкой технического состояния машины. Однако практически все системы мониторинга и диагностики основаны на измерении общего уровня вибрации [1]. Информация об общем уровне вибрации используется для сравнения с установленными стандартами пороговыми значениями и для построения трендов. Это позволяет оценивать в первом приближении скорость изменения состояния машины. Измерение общего уровня виброускорений может быть использовано для контроля технического состояния электродвигателя маслососа. Для более глубокой детальной диагностики требуются более тонкие и дорогие методы.

При разработке программно-аппаратного комплекса мониторинга работы маслососов силовых трансформаторов ставилась задача выявления изменений в работе маслососов путем анализа вибрационной картины каждого маслососа на фоне вибрационной картины совокупности самого силового трансформатора и множества маслососов, расположенных на общем трубопроводе. Кроме того, для полноты анализа и предотвращения аварийных ситуаций, возможных в самом электродвигателе маслососа, необходим мониторинг токов по каждой фазе каждого электродвигателя и при необходимости мгновенная реакция на их запредельные значения.

В результате разработан программно-аппаратный комплекс мониторинга маслососов силовых трансформаторов, основное назначение которого – предотвратить негативное влияние дефектного агрегата (маслососа) на трансформаторное масло путем своевременного отключения такого агрегата. Работа программно-аппаратного комплекса основана на методе сопоставления «вибрационных фотографий». «Вибрационная фотография» представляет собой сохраненный эталонный спектр частот вибраций (по каждой из трех плоскостей) и их амплитуд, снятый на каждом агрегате в период первого пуска либо в ремонтный промежуток, причем эталонные «вибрационные фотографии» снимаются как при работе только лишь одного агрегата, так и при работе всех агрегатов (маслососов).

В основу метода положен тот факт, что любое изменение вибрации любого из маслососов говорит о нарушении в его работе. Непрерывный анализ спектра вибрации и сравнение с эталоном позволяет обнаружить деградиционные изменения в нем. Алгоритм принятия решений должен проводить дополнительный отсев ложных или сопутствующих колебаний, не относящихся к данному агрегату. Это обусловлено тем, что все агрегаты находятся в составе единой механической системы силового трансформатора. В связи с этим в спектрах вибраций каждого агрегата будут присутствовать и колебания, вызванные механическими колебаниями силового трансформатора. Но, так как эти колебания проявляются одновременно на каждом из агрегатов, вызывая одинаковые влияния на спектры каждого из агрегатов относительно эталонных, притом таких изменений, в процентном соотношении, для каждого из агрегатов будет примерно одинаков.

Учитывая то, что предполагается произвольная установка датчиков вибрации на агрегатах без четкой ориентации плоскостей контроля, то для оценки уровня виброускорения используется суммарный вектор, составляемый из совокупности виброускорений трех ортогональных проекций.

На рис. 1-3 представлены карты виброускорений для различных дефектов, снятых на одном из агрегатов однофазного автотрансформатора АОДЦТН-333000/750/330-У1 в период профилактического ремонта. На автотрансформаторе установлены агрегаты маслососов с мощностью электродвигателя 17 кВт и числом оборотов ротора 1500 об/мин.

На рис. 1 приведена эталонная виброграмма агрегата маслососа, а на рис. 2-4 показаны результаты физического моделирования (моделирование износа тела качения) путем внесения дефекта в подшипник (рис. 2) и дальнейшее развитие аварии (рис. 3, 4). На рисунках по оси у приведено виброускорение в относительных единицах, где значение 32767 соответствует  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

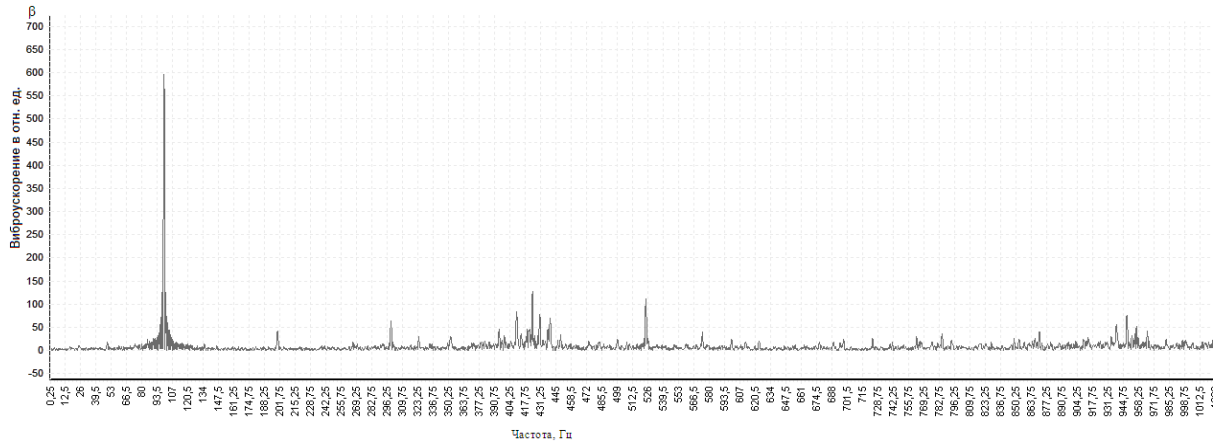


Рис. 1. – Эталонный виброспектр агрегата при автотрансформаторе, работающем на холостом ходу

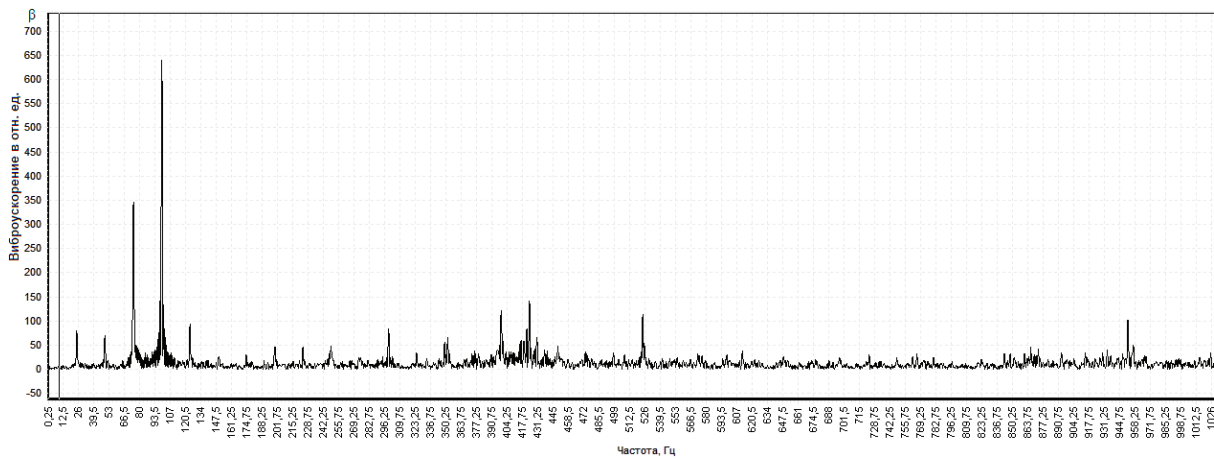


Рис. 2. – Начало развития дефекта подшипника

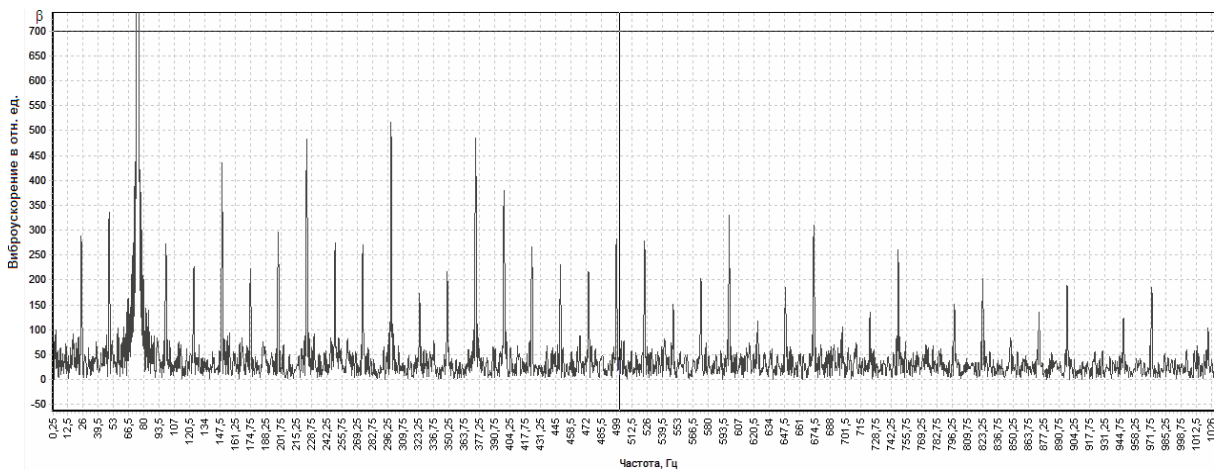


Рис. 3. – Развитие дефекта подшипника

Как видно из представленных диаграмм, в спектрах присутствует ярко выраженная гармоника 100 Гц, которая соответствует магнитоэлектрическим силам. Виброускорение показано в относительных единицах.

Для автоматического мониторинга и защиты комплекса маслонасосов силовых трансформаторов высоковольтных подстанций разработан программно-аппаратный комплекс.

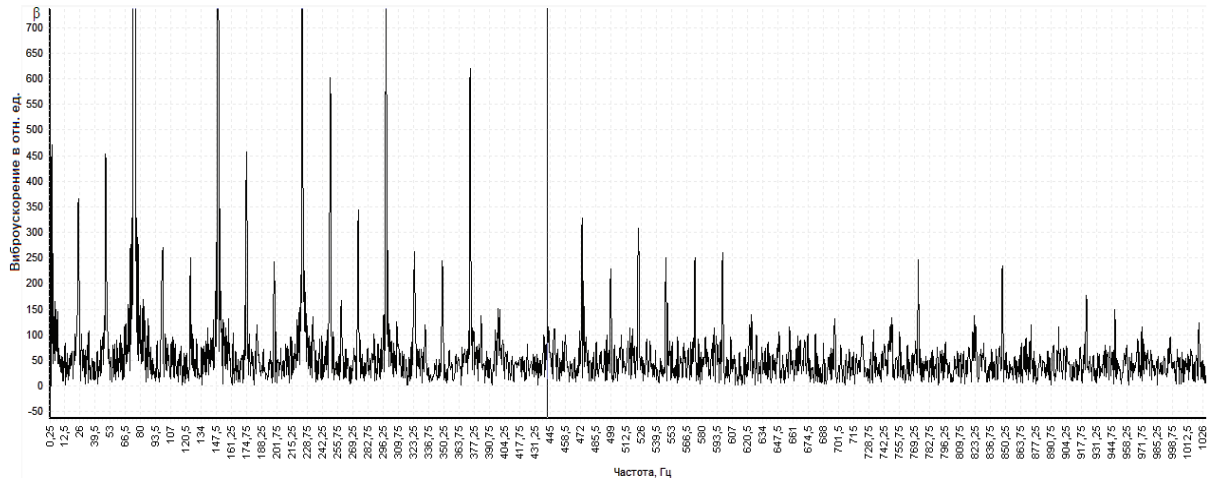


Рис. 4. – Дальнейшее развитие дефекта (разрушение тела качения подшипника)

При разработке комплекса учитывалось то, что число маслонасосов на высоковольтной подстанции может составлять от 12 до 36 и более агрегатов. В связи с этим, основное требование к программно-аппаратному обеспечению – возможность поэтапного ввода в работу, минимальные работы на прокладку информационных каналов связи, быстрое внедрение, минимум подготовки обслуживающего персонала к работе с данным комплексом.

Комплекс построен на основе множества интеллектуальных сенсоров виброускорений (аналогичных используемым в работе [3]) и режимов работы электродвигателя, одного или нескольких Wi-Fi роутеров и общеподстанционного щитового прибора. Wi-Fi роутеры расположены непосредственно на открытом распределительном устройстве подстанции вблизи силовых трансформаторов и обеспечивают высокоскоростную беспроводную связь между множеством интеллектуальных сенсоров и общеподстанционным щитовым прибором.

Интеллектуальные сенсоры расположены непосредственно на агрегатах маслонасосов. В состав интеллектуальных сенсоров входят: трехосевой акселерометр с переключаемой чувствительностью до 16g и частотным диапазоном до 5000 Гц; датчики фазных токов; микроконтроллер STM32f407 с ядром Cortex-M4 с тактовой частотой до 168 МГц; Wi-Fi модуль связи. В функции сенсоров входят все функции по контролю электрических режимов работы электродвигателей, измерение и предварительный анализ изменения частот и уровня виброускорений, формирование и сравнение виброфотографий.

Детальный анализ работы каждого из агрегатов осуществляется общеподстанционным щитовым прибором и отображается на его дисплее в виде графиков, диаграмм и текстовых сообщений. При достижении предельных значений вибрации, выявлении нарушений в работе агрегата, запредельных значений токов в работу включается предупредительная сигнализация и выдается команда на отключение повреждённого агрегата.

Данный комплекс позволяет осуществлять непрерывный контроль вибрационного состояния оборудования, выполнять оценку общего технического состояния оборудования, снизить количество внезапных аварийных отказов, своевременно планировать график ремонтов оборудования, снизить затраты на обслуживание оборудования, снизить воздействие человеческого фактора при измерении вибрации, предотвратить снижение изоляционных свойств трансформаторного масла, вызванных повреждением маслонасосов силовых трансформаторов. Следует отметить, что данный комплекс предоставляет только общую картину состояния насоса и может только указать на наличие дефекта. Дальнейшая диагностика должна производиться специализированными приборами.

### Выводы

Разработан программно-аппаратный комплекс раннего выявления поврежденного маслонасосов силовых трансформаторов. При разработке данного комплекса ставилась упрощенная задача – не выявить конкретный дефект в маслонасосе, а только локализовать поврежденный агрегат для исключения его вредного влияния на трансформаторное масло. Разработанный про-

граммно-аппаратный комплекс обеспечивает и весь спектр защит самих электродвигателей маслонасосов от возникновения и развития аварийных ситуаций, таких как замыкание в обмотке статора, пробой на корпус, неполнофазный режим и т. д. В настоящий момент прототип данного устройства проходит опытную эксплуатацию на объекте.

#### Список использованных источников:

1. Методика диагностики усилия прессовки обмоток трансформаторов / М.Н. Гервиц [и др.] // Электрические станции. – 1997. – № 5. – С. 58-60.
2. Барков А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации : учебное пособие / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. – СПб. : Изд. центр СПбГМУ, 2000. – 159 с.
3. Дьяченко М.Д. Система автоматического дистанционного мониторинга состояния контактных соединений высоковольтного оборудования электрических сетей / М.Д. Дьяченко, Ю.А. Тесля // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2013. – № 6. – С. 19-24.

#### References:

1. Gervits M.N., Osotov V.N., Petrishchev L.S. Metodika diagnostiki usiliiia pressovki obmotok transformatorov [Technique for diagnosing the stress of pressing transformers]. *Elektricheskie stantsii – Electric stations*, 1997, no. 5, pp. 58-60. (Rus.)
2. Barkov A.V., Barkova N.A., Azovtsev A.Iu. *Monitoring i diagnostika rotornykh mashin po vibratsii: uchebnoye posobie* [Monitoring and diagnostics of rotary machines by vibration: textbook]. Saint Petersburg, Izd. tsentr SPbGMTU Publ., 2000. 159 p. (Rus.)
3. D'iachenko M.D., Teslia Iu. A. Sistema avtomaticheskogo distantsionnogo monitoringa sostoianiiia kontaknykh soedinenii vysokovol'tnogo oborudovaniia elektricheskikh setei [The system of automatic remote monitoring of the status of contact connections of high-voltage equipment of electric networks]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Energetika – Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2013, no. 6, pp. 19-24. (Rus.)

Рецензент: И.В. Жежеленко  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 05.04.2017

УДК 621.316.13

© Терешкевич Л.Б.<sup>1</sup>, Хоменко О.О.<sup>2</sup>

### СИМЕТРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЖИМУ ШЛЯХОМ ЗСУВУ В ЧАСІ ГРАФІКІВ НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ ОДНОФАЗНОГО ВИКОНАННЯ

*Розроблено метод симетрування електричного режиму шляхом зсуву в часі графіків навантажень однофазних електроприймачів, що під'єднуються до вузла трипровідної електричної мережі. В основу методу покладено перебір усіх можливих варіантів зсувів графіків навантажень, що дозволяє гарантовано отримати оптимальне рішення за критерієм, що пропорційний додатковим втратам енергії в лінії, яка живить вузол з однофазними електроприймачами. Ефективність досліджень перевірено на контрольному прикладі.*

**Ключові слова:** графіки навантажень, несиметричне навантаження, додаткові втрати енергії, оптимальне рішення, симетрування режиму.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, [lbter@meta.ua](mailto:lbter@meta.ua)

<sup>2</sup> аспірант, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, [o.o.khomenko.vntu@gmail.com](mailto:o.o.khomenko.vntu@gmail.com)